

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
УКРАИНЫ  
ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

**Кроль О.С.**

**МЕТОДЫ И ПРОЦЕДУРЫ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ИНСТРУМЕНТОВ**

*Монография*

**Северодонецк 2015**

УДК 621.9.06-658:512  
ББК 30.2-5-05  
К83

Рекомендовано Ученым советом  
Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля  
(протокол № 3 от 27.11.2015 г.)

Рецензенты:

*Ковалевский С.В.*, д.т.н., проф., Донбасская государственная машиностроительная академия

*Ерошин С.С.*, д.т.н., проф. Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

**Кроль О.С.**

**К 83 Методы и процедуры 3D-моделирования металлорежущих станков и инструментов:** монография. - Северодонецк: изд-во ВНУ им. В.Даля, 2015. – 120 с.: табл. 7. ил. 127. библиогр. 51 назв. Русск. язык.

ISBN 978-617-11-0049-7

В монографии рассмотрены проблемы построения и исследования трехмерных моделей проектируемых металлорежущих станков. Приведен инструментарий создания твердотельных моделей оборудования фрезерно-сверлильно-расточного типа в среде интегрированной САПР КОМПАС-3D. Рассмотрены особенности и эффективные приемы построения компонентов станочных и инструментальных систем с использованием параметризации конструкций и фотореалистического представления в модуле Artisan Rendering. Проведено исследование шпиндельных узлов методом конечных элементов с помощью модуля APM FEM на базе их 3D-моделей. Предложены новые конструкторские решения, относящиеся к зубчатым ременным передачам шевронного профиля и беззачерных червячных передач в виде 3D-моделей

Для ведущих конструкторов и специалистов в области трехмерного моделирования и исследования станочных систем, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

У монографії розглянуті проблеми побудови та дослідження тривимірних моделей проєктованих металорізальних верстатів. Наведено інструментарій створення твердотільних моделей устаткування фрезерно-сверлильно-розточувального типу в середовищі інтегрованої САПР КОМПАС-3D. Розглянуто особливості та ефективні прийоми побудови компонентів верстатних та інструментальних систем з використанням параметризації конструкцій і фотореалістичного уявлення в модулі Artisan Rendering. Проведено дослідження шпиндельних вузлів методом кінцевих елементів за допомогою модуля APM FEM на базі їх 3D-моделей. Запропоновано нові конструкторські рішення, що відносяться до зубчастих пасових передач шевронного профілю і беззачерних черв'ячних передач у вигляді 3D-моделей

Для провідних конструкторів і фахівців в області тривимірного моделювання та дослідження верстатних систем, науковців, викладачів, аспирантів і студентів.

УДК 621.9.06-658:512  
ББК 30.2-5-05

ISBN 978-617-11-0049-7

©Кроль О.С., 2015  
©Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, 2015

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

В практике конструирования все более широкое распространение приобретают методы и процедуры трехмерного моделирования и постепенный переход инженеров-проектировщиков на стратегию 3D-конструирования. В чем же преимущества объемного моделирования?

1. В процессе интеллектуальной деятельности конструктору легче оперировать именно объемными объектами.

2. Трехмерные модели наиболее информативные - с точки зрения конструкции изделия несут полную информацию. В процессе трехмерного моделирования появляется возможность изменить угол обзора, проанализировать внутреннее строение детали, исследовать поверхности, а для агрегатов выполнить виртуальные сборки и разборки.

3. При конструировании металлорежущих станков в качестве конечной цели рассматривается именно трехмерные изделия, на базе которых могут быть получены рабочие чертежи их компонент

4. Появляется возможность проанализировать условия функционирования: характер перемещений, вид и расположение прикладываемых нагрузок, характерных для проектируемого объекта.

5. Математическое описание 3D-моделей эффективно преобразуется в управляющую программу код для станков с ЧПУ и трехмерных принтеров.

Развитие новых информационных технологий преобразует характер деятельности современного инженера-конструктора. В прошлом осталась «ручная» технология выполнения конструкторских расчетов, чертежей и документации, когда главными инструментами проектировщика были карандаш и кульман. Правильность таких чертежей и документации определялась тщательностью выполнения графического изображения, квалификацией проектировщика и пр. Одним из главных недостатков состоял в невозможности эффективного редактирования чертежей и оперативного совершенствования конструкций. Качество выпускаемой конструкторской документации и время выполнения проекта делали этот процесс не конкурентоспособным.

Современные информационные технологии коренным образом изменили принципы конструирования, значительно интенсифицировали процесс разработки изделия, увеличив его точность и надежность многократно. В графических редакторах появляются функции повторного использования предварительно спроектированного изделия, оперативно создавать типовые и унифицированные элементы, максимально ускорить выпуск чертежей и прочей документации. Большим толчком к прогрессу всего процесса проектирования является появление механизма параметризации графического изображения.

Революцией в промышленном проектировании стало внедрение в инструментарий конструирования трехмерной графики. Проектные институты, внедряющие разнообразные системы автоматизированного проектирования (САПР) и расчетные комплексы, резко сокращали сроки завершения рабочего проекта, в отличие от тех организаций, которые не применяли САПР и могли подготовить всего лишь один эскизный проект.

Ассоциативная связь, устанавливаемая в САПР между моделью изделия, его чертежами, а также спецификациями, реализует автоматическое отображение изменений конструкторской документации при внесении изменений в 3D-модель. За счет этого значительно повышается производительность труда проектировщика. Дальнейшее совершенствование САПР постепенно превращает их в системы управления жизненным циклом изделия и инженерными данными, а также гибко управлять этими данными в в разнообразных условиях функционирования промышленных предприятий.

Существующие системы, которые предназначены для инженерного проектирования и моделирования, можно разделить на три категории.

1. *Системы тяжелого класса.* Они оснащены развитыми гибридными трехмерными редакторами ( в которых осуществляется как твердотельное, так и поверхностное моделирование), а также встроенные модули для различных инженерных расчетов. Возникающие трудности при освоении, требуют специальных знаний и навыков. Эти системы очень дорогостоящие, но и очень эффективные и позволяют создавать модели практически любых форм. К системам такого класса относятся NX, CATIA и пр.

2. *Системы среднего класса.* Такие системы позволяют решать большинство задач проектирования с использованием твердотельного моделирования, совершенствуя при этом плоское черчение. В состав этих систем могут входить небольшие модули, решающие типовые расчетные задачи. К этим системам можно отнести Autodesk Inventor, SolidWorks, Solid Edge и т. д.

3. *Узкоспециализированные модули.* Представляют собой, небольшие программы, автоматизирующие решение узкопрофильной задачи

конкретной отрасли промышленности. Эти приложения могут быть самостоятельными, либо базироваться на каких-либо программных пакетах тяжелого или среднего классов.

Среди систем среднего класса выделяется система трехмерного твердотельного моделирования КОМПАС-3D, которая включает встраиваемый расчетный модуль АРМ FRM, реализующий метод конечных элементов в исследованиях конструкций станков по критериям прочности, жесткости и виброустойчивости. САПР КОМПАС сегодня представляет собой многофункциональную систему 3D-CAD с собственным математическим ядром. К преимуществам этой системы относится поддержка как западных, так и отечественных стандартов выполнения чертежей и подготовки документации. Кроме того, собственные изобретения в сфере трехмерного моделирования, удобный чертежно-графический редактор, большое количество библиотек и приложений могут сделать процесс проектирования быстрым и эффективным.

Другим направлением развития компьютерных систем для проектирования являются инженерные расчеты. Этот класс программ начал бурно развиваться параллельно с появлением 3D в конструировании. Трехмерное представление напряжений от действующих нагрузок, трехмерное распределение (поле) температур, прочностной, кинематический, динамический анализ и многое другое стали арсеналом инженера, использующего такие системы. Большое количество проектных задач, которые ранее трудно было выполнить или которые требовали специалистов высокой квалификации, в настоящее время эффективно решаются с помощью таких программ.

Предметом исследования данной монографии являются методы и процедуры компьютерного моделирования конструкций металлорежущих станков и систем фрезерно-сверлильно-расточного класса.

Целью таких исследований является совершенствование конструкторской подготовки производства в станкостроительной области за счет использования развитых средств и систем автоматизированного проектирования.

В процессе таких исследований реализуется построение и исследование твердотельных моделей:

- станков с ЧПУ и обрабатывающих центров;
- широкой гаммы механических передач, используемых в коробках передач данного класса станков;
- инструментального обеспечения, включающего инструментальные магазины, автооператоры, вспомогательные и режущие инструменты;
- разнообразных и сложных корпусных деталей несущей системы станка.

На кафедре «Машинобудування, верстати та інструменти» Східноукраїнського національного університету в 2012...2015 г.г. проведені масштабні роботи по 3D-моделюванню металорежущих станків і інструментів. Студенти кафедри стали переможцями Міжнародного конкурсу «Будущие Асы КОМПьютерного 3D-моделювання», проводимого групою компаній АСКОН. С конкурсними проектами можна ознайомитися в Галереї проектів за 2012...2015 г.г.

Автор виражає подяку студентам кафедри Бурлакову Е.И., Осипову В.И., Сухорутченко И.А., Журавлеву В.В., Хмельницькому А.В., Литвиненко С.С. за високий рівень професійного майстерства при створенні 3D-моделей станочних систем з максимальним використанням можливостей системи КОМПАС-3D.

---

---

# **1. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ФРЕЗЕРНО- СВЕРЛИЛЬНО-РАСТОЧНОГО ТИПА**

## **1.1. 3D-моделирование обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4**

Четырехкоординатный широкоуниверсальный фрезерно-сверлильно-расточной станок модели СФ68ВФ4 нашел широкое применение в инструментальном, экспериментальном и серийном производствах. Он оснащен горизонтальным и вертикальным шпинделями, что обеспечивает обработку деталей со всех сторон, а также соосную расточку отверстий без переустановки заготовки. Дополнительная оснастка в виде малогабаритной угловой и долбежной головок позволяет осуществлять обработку в труднодоступных местах, а также прямоугольных и фасонных пазов. Наличие в конструкции станка поддерживающего хобота обеспечивает производительную обработку дисковыми и фасонными фрезами.

Студенты кафедры машиностроения, станков и инструментов Хмельницкий А.В. и Осипов В.И. разработали 3D-модель станка СФ68ВФ4 [1, 2] которая представлена в галерее конкурса Будущих асов компьютерного 3D- моделирования, проводимого группой компаний АСКОН в 2013 и 2015 годах. 3D-модель состоит из 2640 моделей деталей и сборок и изображена на рис. 1.1.

Шпиндельная бабка станка (рис. 1.2) состоит из; корпуса чугунного литого, шпиндельного блока с механизмом автоматического зажима инструмента, распределительного вала, передающего вращение на горизонтальный или вертикальный шпиндель с помощью автоматического устройства переключения ведущей шестерни; двухступенчатой коробки скоростей управляемой гидрофицированным механизмом переключения; привода подачи, устройства подачи СОЖ в зону резания; электрических и оптоэлектрических датчиков контролирующих положение шпиндельной бабки и ее механизмов, а также целого ряда других деталей и узлов, обеспечивающих нормальное функционирование шпиндельной бабки от устройства ЧПУ. Сечение горизонтальной шпиндельной бабки в 3D представлено на рис. 1.3.

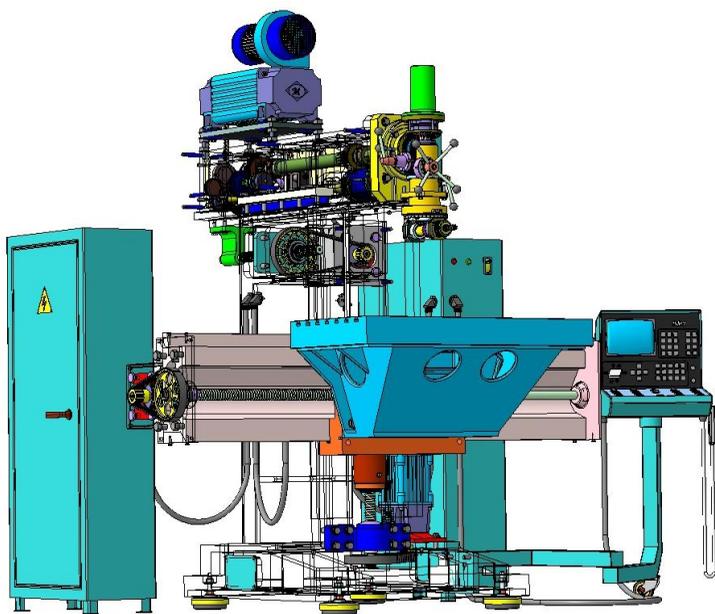


Рис. 1.1. 3D-модель широкоуниверсального станка СФ68ВФ4

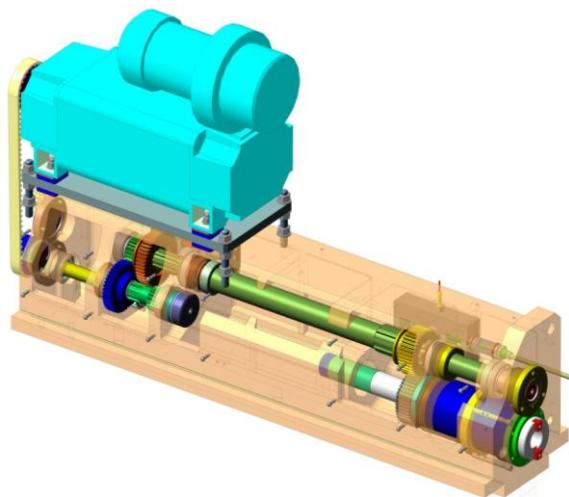


Рис. 1.2. 3D-модель шпиндельной бабки

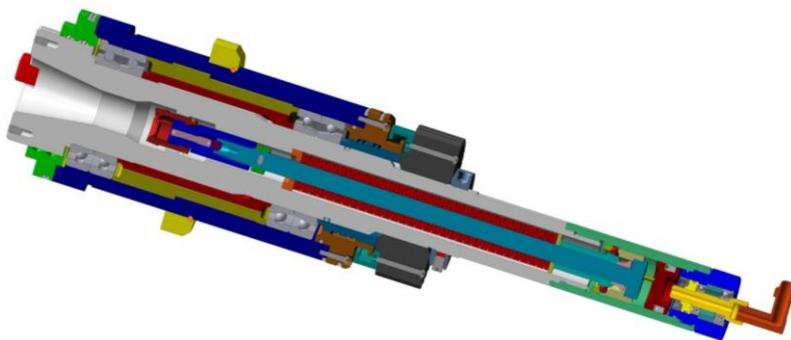


Рис. 1.3. Сечение горизонтальной шпиндельной бабки

В процессе создания проекта станка СФ68ВФ4 были выполнены разнообразными твердотельные модели деталей станка (рис 1.4).

Вращение шпинделя (рис. 1.5) производится следующим образом: от электродвигателя через поликлиновой ремень передается на двухступенчатую коробку скоростей, с выходного вала которой, движение передается на муфту вертикальной головки или долбежной головки, либо на шестерню горизонтального шпинделя, вращающегося с частотой вращения  $20 \dots 4000 \text{ мин}^{-1}$ .

Фотореалистическое изображение горизонтальной шпиндельной бабки создает определенную техническую эстетику и влияет на конкурентоспособность конструкции (рис. 1.6).

Шпиндель монтируется на двух опорах на сдвоенных радиально-упорных подшипниках с предварительным натягом по схеме «тандем – О» (рис. 1.7). В передней опоре используются подшипники особолегкой серии 2-446113 ГОСТ 832-78 с углом контакта  $\alpha = 26^\circ$ . Наружные кольца этих подшипников обращены друг к другу разноименными торцами. Тип соединения «тандем» характеризуется способностью выдерживать большие осевые однонаправленные нагрузки. Величина выдерживаемой радиальной нагрузки и радиальная жесткость зависят от величины выполненного предварительного натяга. При монтаже такого соединения следует строго проверять совпадение углов контакта подшипников  $\alpha$ . На задней опоре монтируется два радиально-упорных подшипника особолегкой серии 2-446112 ГОСТ 832-78.

Для более эффективной процедуры анализ на технологичность выполнена анимация шпиндельного узла станка модели СФ68ВФ4 (рис. 1.8)

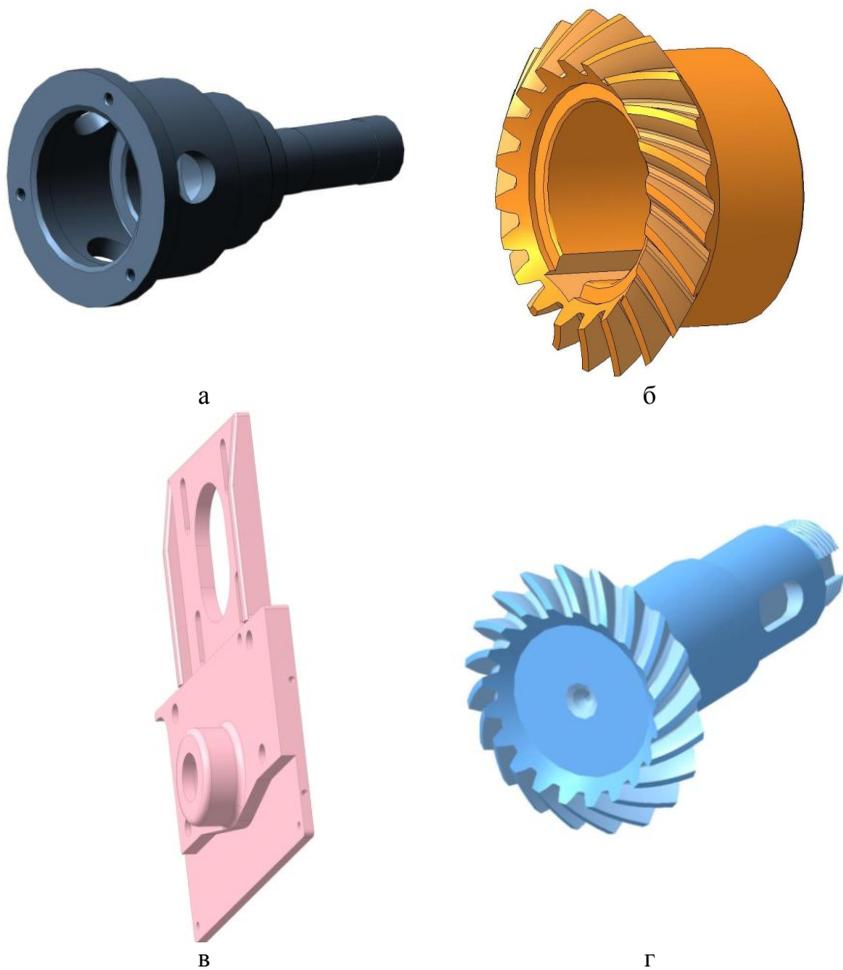


Рис. 1. 4. 3D-модели деталей станка СФ68ВФ4:  
а – поводок головки быстроходной; б – коническое колесо с круговым зубом;  
в – кронштейн шариковой винтовой передачи; г – вал – шестерня коническая

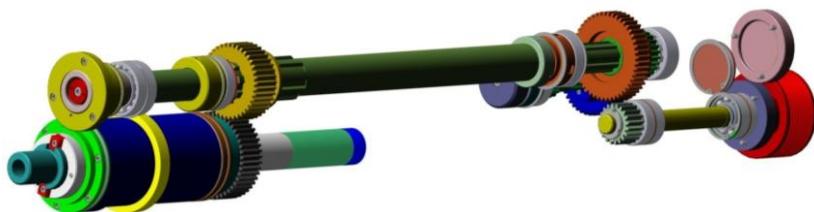


Рис. 1.5. Кинематика шпиндельной бабки в 3D

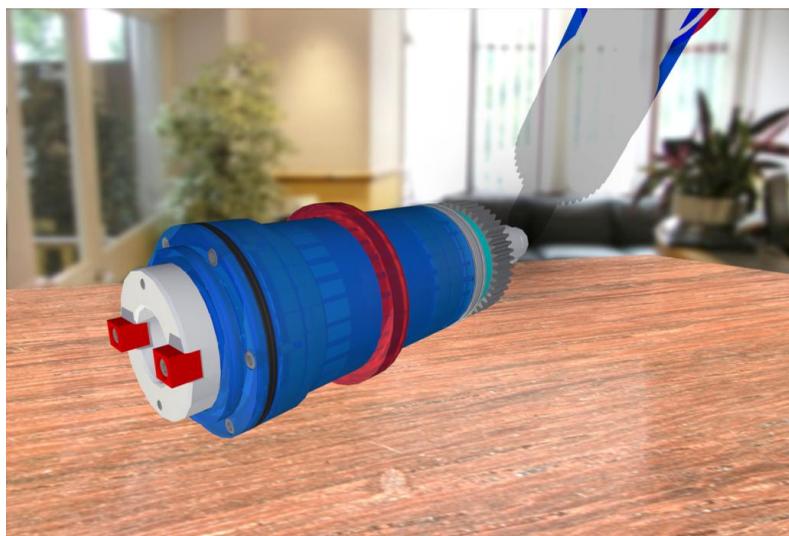


Рис. 1.6. Фотореалистическое отображение горизонтальной шпиндельной бабки

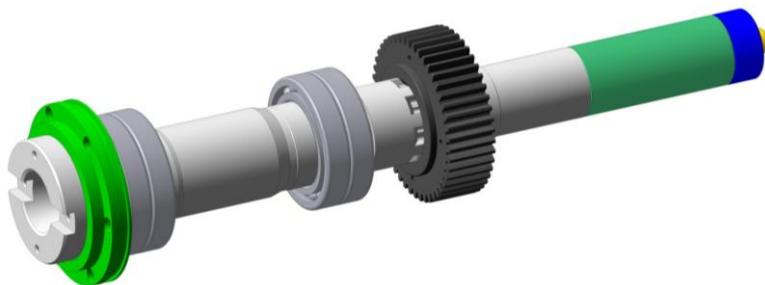


Рис. 1.7. Шпиндель с опорами в 3D

В общем случае данную конструктивную схему (рис. 1.3) следует рассматривать как статически неопределимую балку на четырех опорах (подшипник-опора), которые в общем случае обладают линейными  $A$  и угловыми  $a$  податливостями. Для уменьшения трудоемкости достаточно корректно заменить сдвоенные подшипники одной опорой, переходя к двухопорной расчетной схеме [3, 4, 5, 6]. 3D-модель шпинделя горизонтальной бабки представлена на рис. 1.9

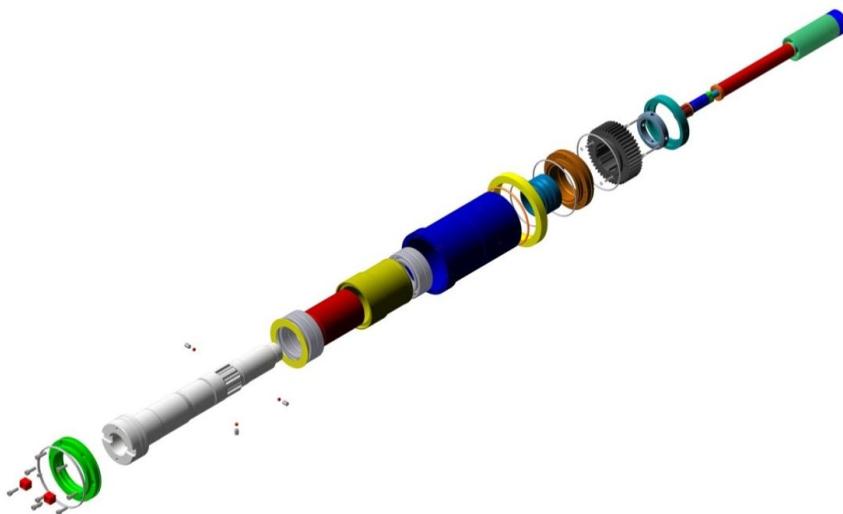


Рис. 1.8. Анимация шпиндельного узла



Рис. 1.9. 3D-модель шпинделя горизонтальной бабки

Для эффективного моделирования, расчета напряженно-деформированного состояния с учетом угловой податливости опор используем модуль комплексного анализа трехмерных конструкций APM Structure 3D [ 7 ], который интегрирован в САПР КОМПАС-3D в виде модуля APM FEM [ 8 ].

В процессе моделирования в среде APM Structure 3D создается «каркасная» модель конструкции шпинделя с оправкой (рис. 1.10), в которой границы стержневых элементов определяются узлами в тех точках, где прикладывается нагрузка или меняется изгибная жесткость сечения. Каждый стержень имеет конкретные размеры и соединен с помощью узлов с остальными стержнями конструкции.

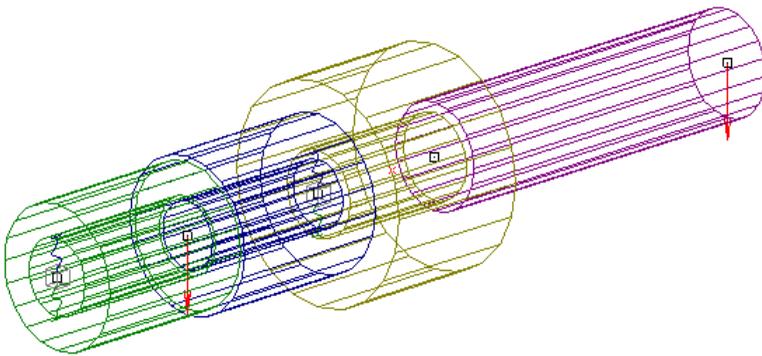


Рис. 1.10. Каркасная модель конструкции шпинделя

Для проведения расчета этой конструкции необходимо дополнительно задать:

- поперечные сечения каждому из стержней;
- опоры для созданной конструкции, определяющие ее положение в пространстве. ;
- внешние нагрузки, действующие на конструкцию;
- параметры материала элементов конструкции

Особенностью задания опор является возможность совмещения в одной опоре и жесткого и упругого закрепления, каждое из которых являются совершенно различными объектами. Они будут функционировать совместно в том случае, когда действуют по различным направлениям системы координат в узле. Для проектируемой конструкции разрешены перемещения по направлению действия сил  $P_y$  (ось  $z$ ) и  $F_r$  (упругое закрепление) и поворот вокруг оси  $z$ . В режиме задания жесткого

закрепления, включением флажков в полях перемещения в направлении оси следует задать ограничения по перемещению в направлении осей  $x$  и  $y$ , а также повороты вокруг этих же осей.

Расчет в среде APM Structure3D позволяет оценить полную картину напряженно-деформированного состояния вала в любом его сечении, включая оценку нагрузок, силовые факторы и др., представленные в пункте меню «Результаты». На рис. 1.11. представлено поле перемещений, характерное для типовой операции растачивания, производимой на многооперационном станке СФ68ВФ4

Максимальные перемещения в консольной части узла с учетом угловых перемещений составляют  $y_{\max} = -0,0285$ ;  $\theta_{\max} = 0,000768$  рад.

Анализ полученных результатов позволяет выбрать наилучшие конструктивные решения, работая с различными нагружениями и их комбинациями. При этом появляется возможность проектировать конструкции близкие к равнопрочным по критерию жесткости.

Наличие вертикального шпинделя и жесткого горизонтального стола позволяет полностью использовать рабочее пространство при обработке крупногабаритных деталей размером  $1000 \times 500 \times 500$  мм.

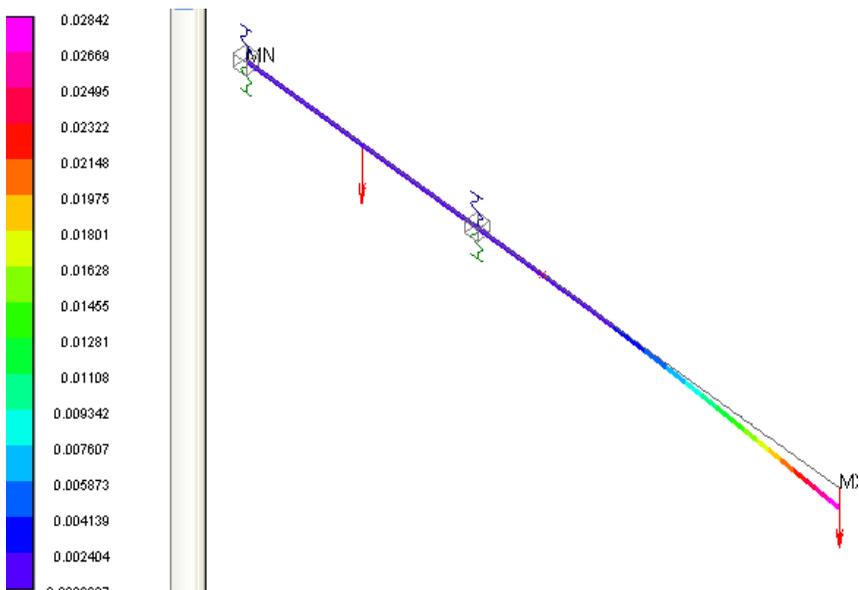


Рис. 1.11. Эпюра перемещений шпиндельного узла

### *1.1.1. Вертикальная шпиндельная головка*

Наличие вертикального шпинделя и жесткого горизонтального стола позволяет полностью использовать рабочее пространство при обработке крупногабаритных деталей размером 1000×500×500 мм.

Головка вертикальная крепится к шпиндельной бабке четырьмя винтами и центрируется при помощи двух конических штырей и втулок. Наибольший ход пиноли 90 мм. Зажим пиноли осуществляется с четырех сторон, с помощью зажимных секторов посредством вращения рукоятки. Для силовых режимов работы применяется блокировка пиноли зубчатым фиксатором в пределах шага рейки - 4,166 мм.

Благодаря наличию Т -образного паза в переходной плите головка поворачивается на 90° в обе стороны. Установка головки в нужное положение осуществляется штифтом.

Для точной установки головки в вертикальном положении используется контрольная оправка, вставляемая и зажатая в конусном отверстии шпинделя, и стрелочный индикатор. Зажим и разжим инструмента осуществляется гидрофицированным механизмом, закрепляемым на задней части шпинделя. Инструмент зажимается в рабочем шпинделе пакетом тарельчатых пружин. Следовательно, зажим осуществляется механически, причем инструмент остается закрепленным даже в случае отказа гидравлики. Разжим происходит при подаче давления в полость цилиндра при не вращающемся шпинделе. В период разжима происходит разгрузка подшипников шпинделя от усилия необходимого для сжатия пакета тарельчатых пружин, чем обеспечивается точность и долговечность подшипников.

3D-модель вертикальной шпиндельной головки представлена на рис. 1.12, а; б. Вертикальный шпиндель смонтирован в гильзе, имеющей перемещение в корпусе, получающей вращение через коническую пару и кулачковую муфту.

Вертикальный шпиндель монтируется на двух опорах (рис. 1.13):

- нижняя опора – двоянные радиально-упорные шариковые подшипники 2-446112 ГОСТ 832-75 особолегкой серии диаметров 1, установленные по схеме «тандем» с предварительным натягом  $P_H = 390$  Н. Они обеспечивают фиксацию шпинделя и корпуса в радиальном и осевом направлении;

- верхняя опора – одинарный радиально-упорный шариковый подшипник 2-446111 ГОСТ 831-75 установленный с предварительным натягом  $P_H = 370$  Н.

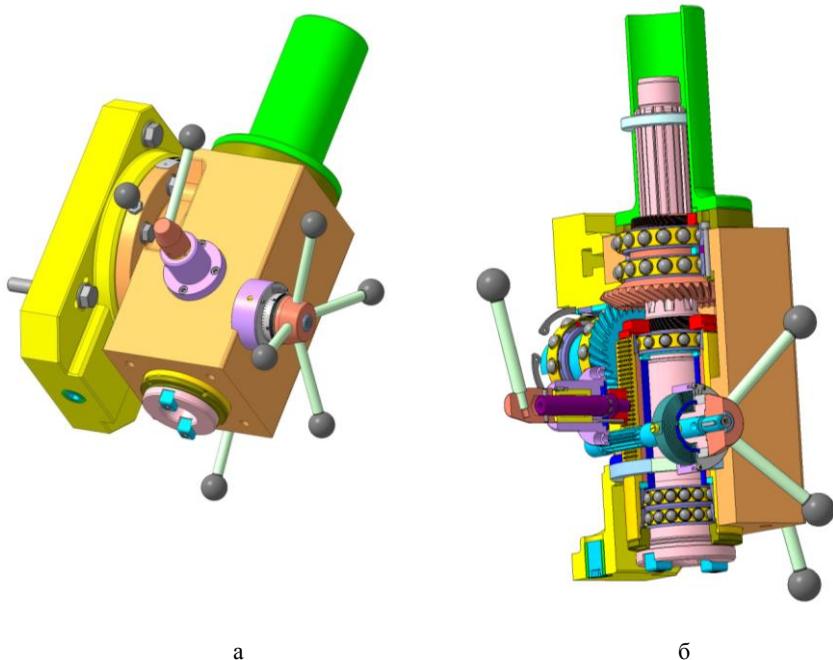


Рис. 1.12. 3D-модель вертикальной шпиндельной головки:  
а – общий вид; б – сечение

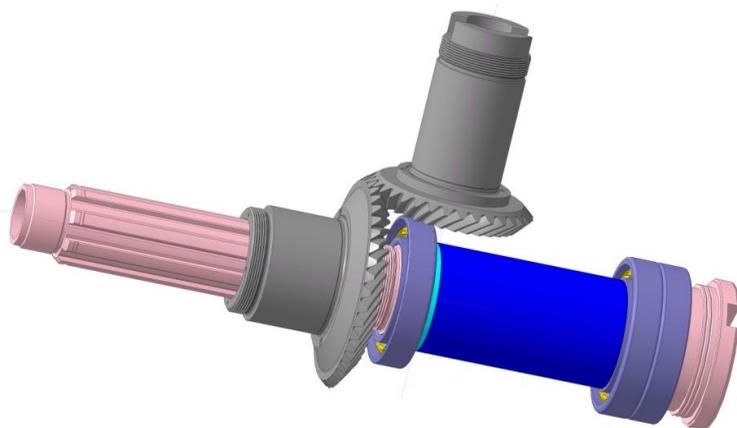


Рис. 1.13. Вертикальный шпиндель с опорами

На рис. 1.14 показана 3D-модель вертикального шпинделя станка модели СФ68ВФ4.

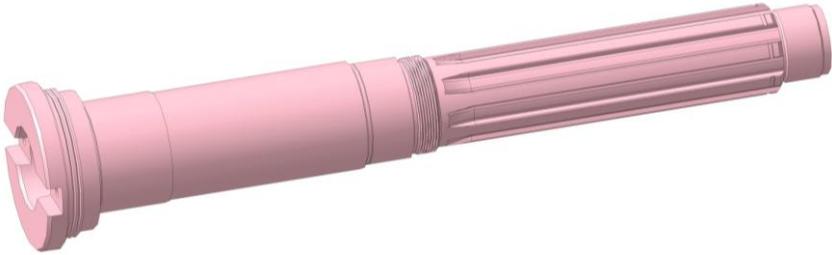


Рис. 1.14. Шпиндель вертикальной головки в 3D

### ***1.1.2. Угловая шпиндельная головка***

Для анализа работоспособности конструкции, выбора оптимального варианта проекта и его исследования методом конечных элементов создана 3D-модель угловой шпиндельной головкой (рис. 15, а; б) в САПР КОМПАС-3D.

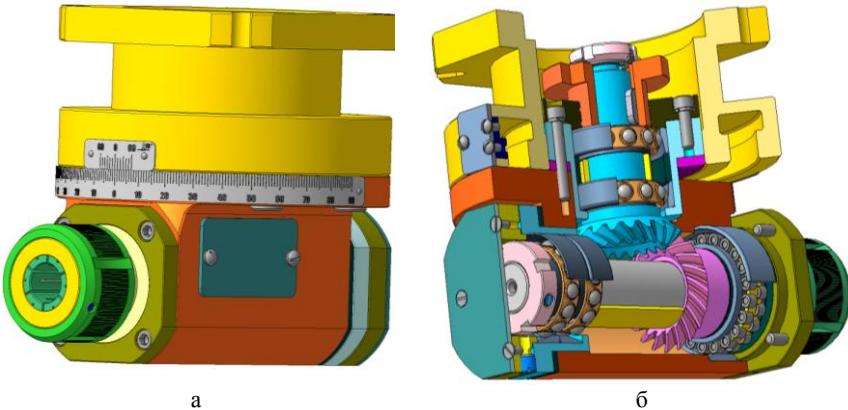


Рис. 1.15. Угловая головка станка модели СФ68ВФ4: а – общий вид; б - конструкция

Угловая головка станка СФ68 позволяет расширить технологические возможности фрезерно-сверлильно-расточных станков. Угловая головка используется для обработки уступов и пазов, расположенных в

труднодоступных участках заготовок плоскостей. Она реализует высокопроизводительную обработку при частотах вращения шпинделя до  $4000 \text{ мин}^{-1}$  с возможностью угла поворота шпинделя на  $360^{\circ}$  в горизонтальной плоскости. Движение от вертикального шпинделя на шпиндель головки угловой передается через коническую передачу. Наиболее характерной операцией, осуществляемой с помощью угловой головки, является фрезерование плоскостей, пазов и уступов концевой фрезой. Данный типоразмер головки оснащается набором концевых фрез с диаметром в диапазоне  $3 \dots 25 \text{ мм}$ .

Шпиндель угловой головки монтируется на двух опорах (рис. 1.16):

Передняя - подшипник 3182108 - роликовый радиальный двухрядный с короткими цилиндрическими роликами с коническим отверстием внутреннего кольца с бортами на внутреннем кольце. Направление воспринимаемых нагрузок - радиальное. Допускают регулировку радиального зазора. Подшипник соответствует стандарту ГОСТ 7634-75.

Задняя: - подшипник 246205 - шариковый радиально-упорный сдвоенный, наружные кольца которого обращены друг к другу широкими торцами, угол контакта  $\alpha=26^{\circ}$ . Направление воспринимаемых нагрузок - радиальное и осевое в обе стороны. Комплект подшипников фиксирует вал и корпус в обоих осевых направлениях и обеспечивает более жесткую угловую фиксацию вала чем соответствующий подшипник 346205. Подшипник соответствует стандарту ГОСТ 832-78.

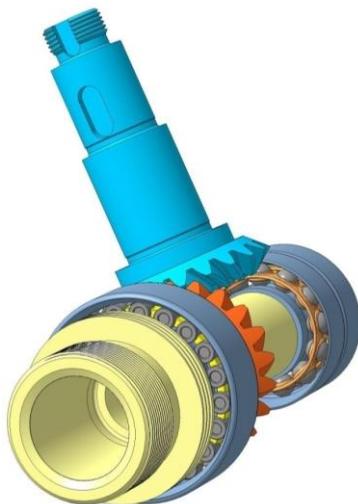


Рис. 1.16. Шпиндельный узел с опорами

Комплексный инженерный анализ напряженно-деформированного состояния шпинделя станка СФ68 (рис. 1.17, а) осуществим с помощью модуля APM FEM [8], оснащенного генератором конечно-элементной сетки, входящим в CAE - библиотеку, которая реализует решения инженерных задач методом конечных элементов (МКЭ). В процессе проектирования осуществляется крепление в передней и задней опорах и задаются прикладываемые нагрузки (рис. 1.17, б); определяются совпадающие грани (для КЭ-анализа сборки); осуществляется генерация КЭ-сетки (рис. 1.17, в) методом MT Frontal (с использованием многоядерности процессора); выполняется расчет и просмотр результатов в виде карт напряжений и перемещений. В процессе МКЭ имеется возможность оценки и анализа разбиения при различных величинах глубины просмотра (рис. 1.17, г).

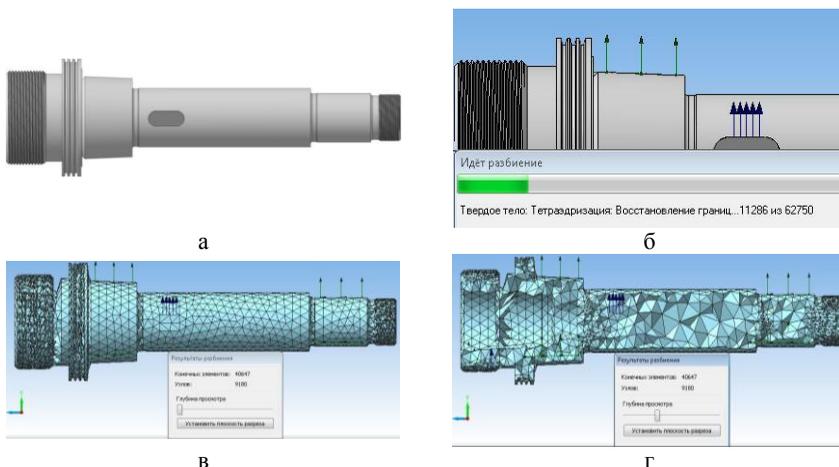


Рис. 1.17. Процедуры метода конечных элементов:  
 а – 3D-модель шпинделя; б – опоры и нагрузки, действующие на шпиндель;  
 в – конечно-элементная сетка; г – глубина просмотра

В рамках модуля APM FEM осуществлены все вышеперечисленные действия и получены:

- поля эквивалентных напряжений по Мизесу (четвертая теория прочности), представленных на рис. 1.18;
  - поля перемещений (рис. 1.19) на множестве сечений шпинделя;
  - коэффициент запаса прочности по пределу текучести (рис. 1.20).
- Ниже приведен протокол расчета в APM FEM (рис. 1.21)

Результаты статического расчета

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Эквивалентное напряжение по Мизесу	SVM [МПа]	0.000606	4803.127843

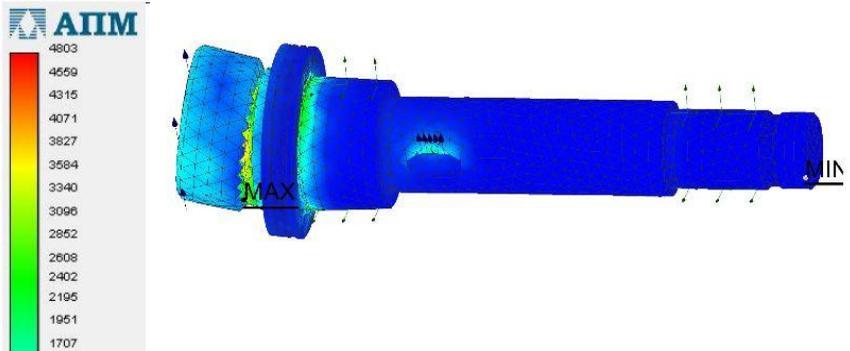


Рис. 1.18. Напряженное состояние шпинделя

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Суммарное линейное перемещение	USUM [мм]	0	1.160879

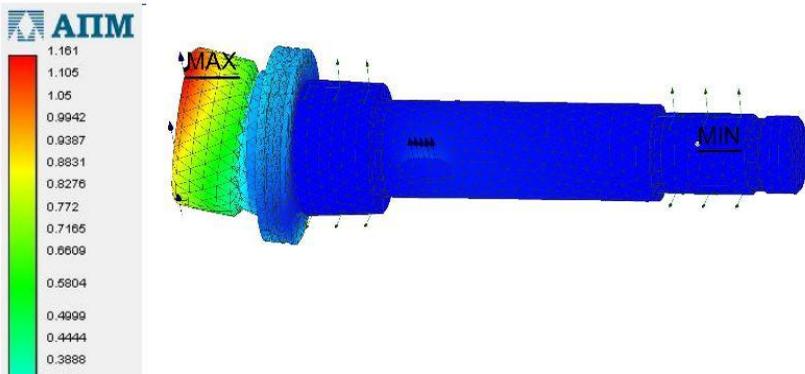


Рис. 1.19. Суммарные линейные перемещения

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент запаса по текучести		0.049165	1000

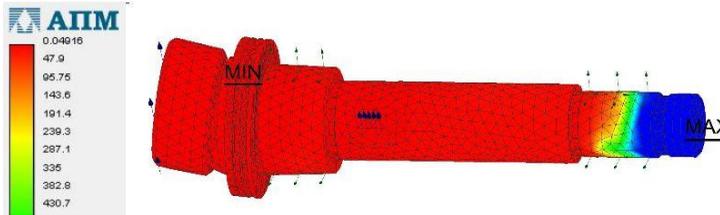


Рис. 1.20. Коэффициент запаса прочности

### 3) Информация о нагрузках

Наименование	Выбранные объекты	Параметры нагрузки
Удельная сила по длине: Удельная сила по длине:1	Ребра: 1	Вектор нагружения: X = 870, Y = 2516, Z = 0 Величина: 2662.171294 Н/мм
Удельная сила по длине: Удельная сила по длине:2	Ребра: 1	Вектор нагружения: X = 755, Y = 2265, Z = 0 Величина: 2387.519633 Н/мм

### 4) Информация о закреплениях

Наименование	Выбранные объекты	X [мм]	Y [мм]	Z [мм]	Rot. X [град]	Rot. Y [град]	Rot. Z [град]
Закрепление: Закрепление:1	Грани: 1	Запрещ.	Запрещ.	Запрещ.	-	-	-
Закрепление: Закрепление:2	Грани: 1	Запрещ.	Запрещ.	Запрещ.	-	-	-

### 5) Конечно-элементная сетка

#### Параметры и результаты разбиения

Наименование	Значение
Максимальная длина стороны элемента [мм]	5
Максимальный коэффициент сгущения на поверхности	1
Коэффициент разрежения в объеме	1.5
Количество конечных элементов	25754
Количество узлов	5659

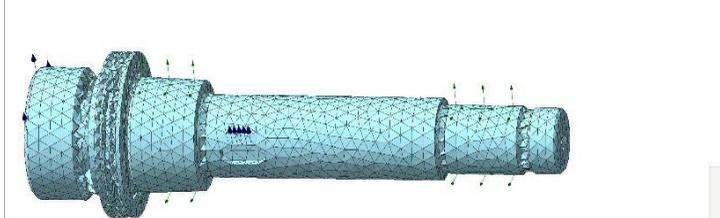


Рис. 1.21. Протокол расчета шпинделя станка СФ68ВФ4

## 1.2. 3D-моделирование станка вертикального многооперационного модели СВМ1Ф4

В качестве объекта моделирования рассматривается специализированный многооперационный станок с ЧПУ второго типоразмера фрезерно-сверлильно-расточного типа на базе модели СВМ1Ф4. На станке может выполняться обработка вертикальных, горизонтальных и наклонных плоскостей, фасонных поверхностей, отверстий, пазов различными технологическими методами: фрезерованием, сверлением, зенкерованием и развертыванием

В конструкции рассматриваемого станка с ЧПУ имеются такие специфические узлы, как гидравлический блок для точного позиционирования шпинделя и специальная шпиндельная бабка, реализующая главное формообразующее движение. В приводе главного движения используется регулируемый привод на базе двигателя постоянного тока и тиристорным преобразователем напряжения

Для автоматизированного манипулирования заготовками и режущими инструментами различных размеров и форм в данном станке используется дополнительная модульная оснастка и, в частности поворотный стол, которые позволяют реализовать выполнение большого числа различных технологических операций без переустановки обрабатываемых деталей.

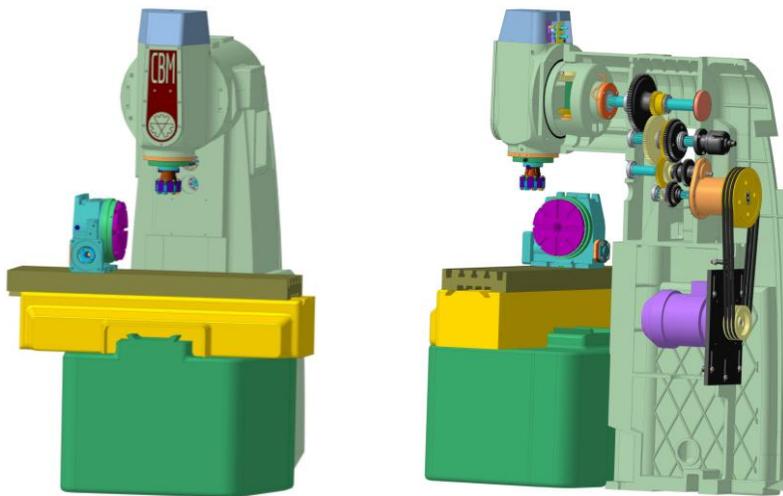


Рис.1.22. 3D- модель станка СВМ1Ф4

Станок оснащен дозированной автоматической системой смазки типа «Трибон» для направляющих скольжения, передач ВГК и опор качения шпиндельной группы.

Для анализа работоспособности конструкции и выбора оптимального варианта проекта специализированного многооперационного станка с ЧПУ модели СВМ1Ф4, оснащенного автоматической сменой инструмента и поворотным столом, создана 3D-модель станка [9, 10] в САПР КОМПАС-3D (рис. 1.22).

Твердотельные модели деталей различных узлов станка представлены на рис. 1.23.

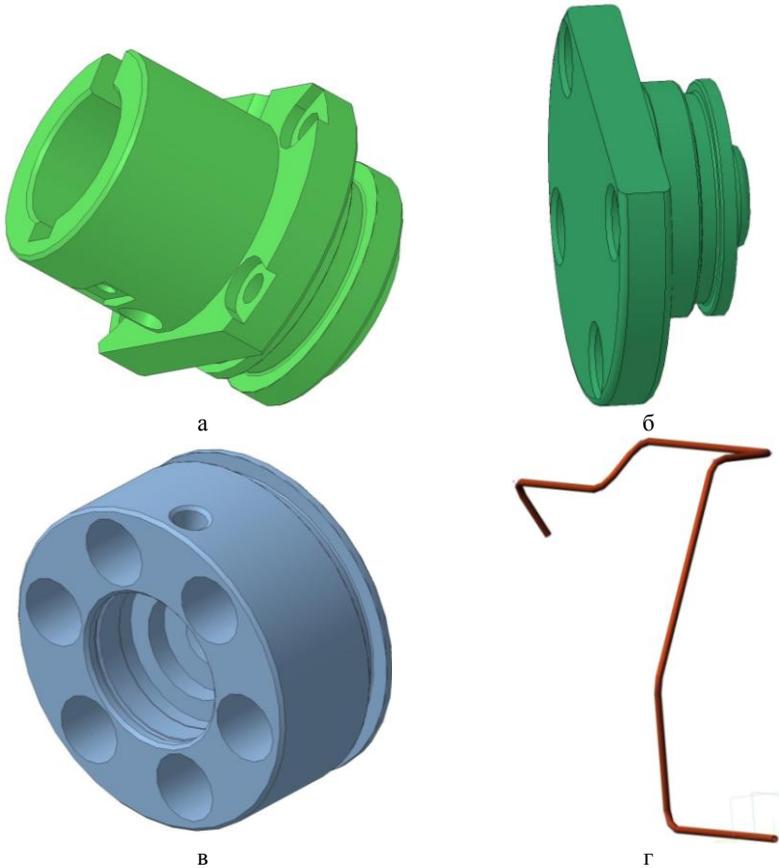


Рис. 1.23. 3D- модели деталей станка СВМ1Ф4: а – фланец гидроблока; б – крышка гидроблока; поршень; г – трубка шпиндельной головки

Кинематические цепочки, реализующие выполнение комплекса технологических операций представлено на рис. 1.24.

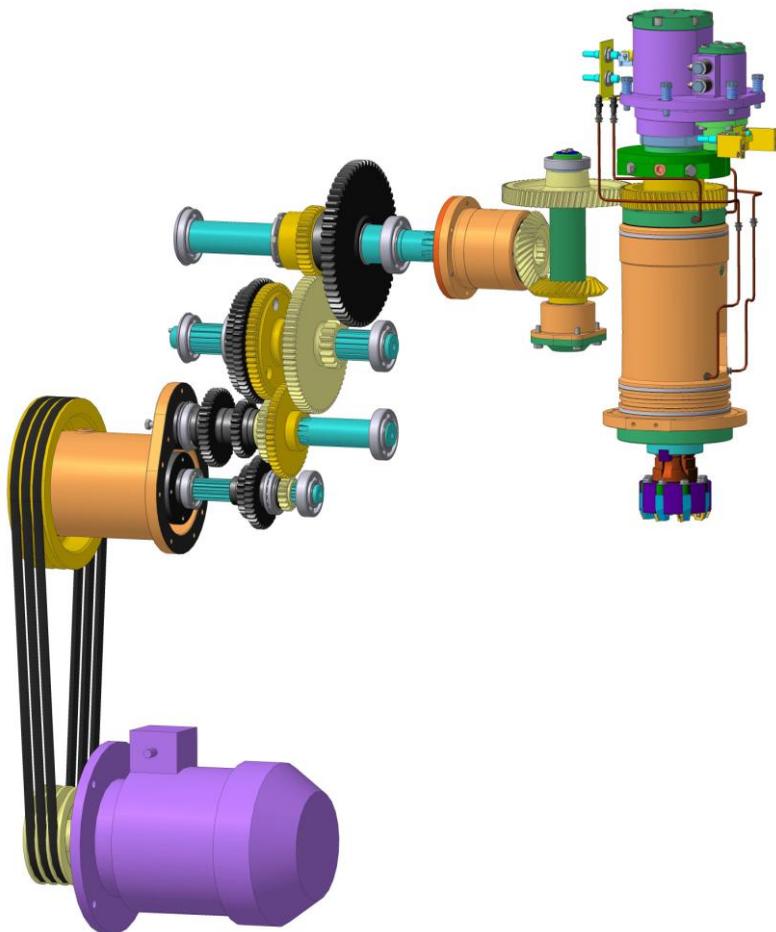


Рис. 1.24. Кинематические цепочки станка

Обеспечение определенного уровня точности и виброустойчивости станков связано с анализом и определением их жесткости и податливости. Оценка рационального баланса податливости станка является актуальной задачей и может выступать как критерий оптимизации при определении статической жесткости базовых деталей и

конструкции в целом. Так деформации подвижных шпиндельных бабок фрезерных и многооперационных станков могут составлять до 70 % общей.

### ***1.2.1. Шпиндельная бабка***

Для оценки жесткости шпиндельной бабки станка СВМ1Ф4 разработана 3D-модель [9] этого формообразующего узла (рис. 1.25). Конструкция шпиндельной бабки представлена в разрезе (рис. 1.25, а), а ее рендеринг в модуле Artisan Rendering на рис. 1.25, б.

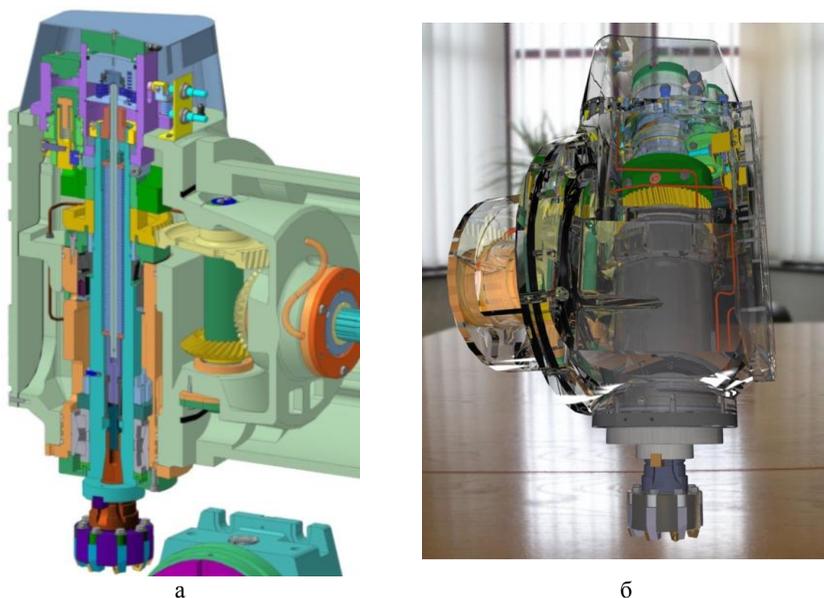


Рис. 1.25. Шпиндельная бабка станка СВМ1Ф4:  
а – разрез шпиндельной бабки; б – рендеринг в модуле Artisan Rendering

В нижней опоре шпинделя установлен высокоточный радиально-упорный двухрядный конический роликовый подшипник, который воспринимает радиальные и двухсторонние осевые нагрузки и характеризуется допустимой радиальной нагрузкой в 1,7 раза выше, чем у соответствующего однорядного подшипника. Кроме этого, он обеспечивают повышенную жесткость опоры.

В верхней опоре установлен радиально-упорный конический подшипник, который допускает раздельный монтаж колец и его конструкция обеспечивает предварительный натяг пружинного типа (рис. 3). В процессе построения сложных 3D-сборок было выполнено построение 3D-моделей деталей и узлов, входящих в шпиндельную головку

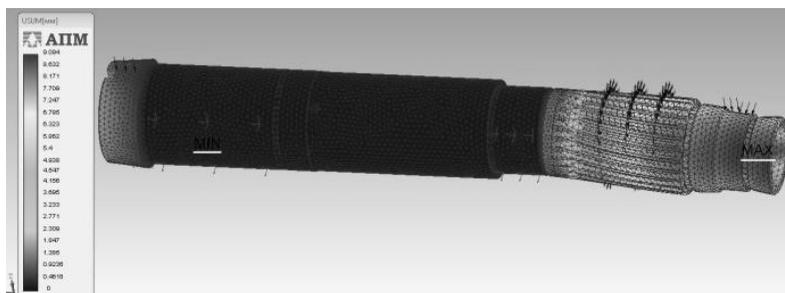
Комплексный инженерный анализ напряженно-деформированного состояния шпинделя станка осуществим с помощью модуля APM FEM [7, 8], оснащенного генератором конечно-элементной сетки, входящим в САЕ – библиотеку, которая реализует решения инженерных задач методом конечных элементов (МКЭ). В процессе проектирования осуществляется крепление в верхней и нижней опорах и задаются прикладываемые нагрузки; определяются совпадающие грани (для КЭ-анализа сборки); осуществляется генерация КЭ-сетки методом MT Frontal (с использованием многоядерности процессора); выполняется расчет и просмотр результатов в виде карт напряжений и перемещений.

В рамках модуля APM FEM осуществлены все вышеперечисленные действия и получены:

- поля эквивалентных напряжений по Мизесу (четвертая теория прочности), представленных на рис. 1.26, *а*;
- поля перемещений (рис. 1.26, *б*) на множестве сечений шпинделя.



*а*



*б*

Рис. 1.26. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния шпинделя:  
*а* – поля напряжений; *б* – поля перемещений

### 1.2.2. Поворотный стол

В условиях производства все большего количества типоразмеров станков и постоянной смены конфигурации обрабатываемых деталей перспективным является проектирование и производство линейки поворотных столов, оснащенных гидромеханическими приводами [11].

Стол поворотный управляемый выполнен в виде самостоятельного узла, устанавливаемого на столе станка в двух положениях с вертикальной и горизонтальной осью, в зависимости от расположения обрабатываемой поверхности. В САПР КОМПАС построена 3D-модель поворотного стола состоящая из более чем 300 деталей [12] (рис. 1.27).

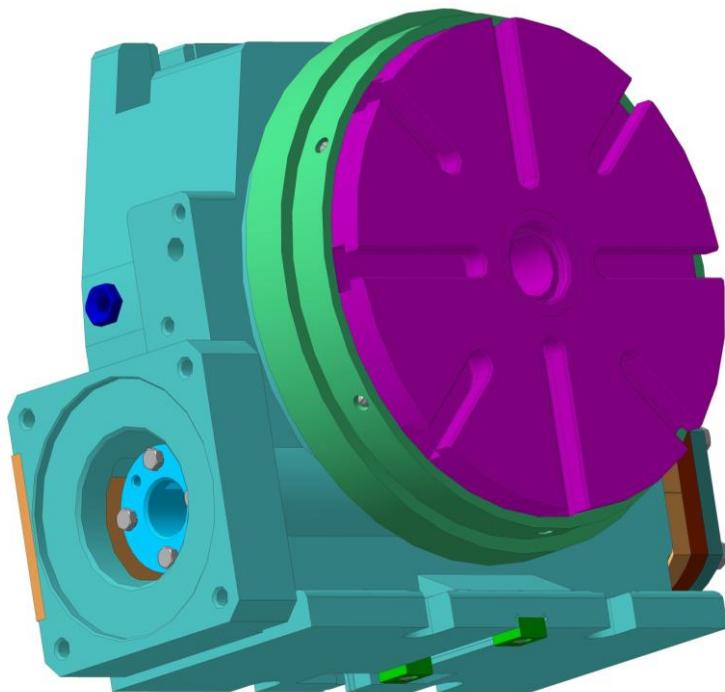


Рис. 1.27. Стол поворотный управляемый

Стол состоит из корпуса, в котором находится червячная пара, передающая движение от высокомоментного двигателя на исполнительный орган – планшайбу (рис. 1.28, а). Управление столом поворотным

осуществляется посредством УЧПУ через круговой индуктосин ПУИ-18А. Поворот планшайбы на заданный угол контролируется оптическим датчиком, установленным на вертикальной оси поворотного стола. Крепление деталей к столу поворотному производится по Т-образным пазам. Изменение рабочей скорости планшайбы стола поворотного производится плавно в пределах от 0,1 до 3,5 мин<sup>-1</sup>, ускоренное перемещение составляет 6,5 мин<sup>-1</sup>. В случае расположения стола поворотного с горизонтальной осью для поддержания консольно-расположенной детали используется задняя бабка.

Для повышения точности базирования червячного колеса (рис. 1.28, б) в приводе поворотного стола недостаточно использовать только одну коническую посадочную поверхность. Необходимо также предусмотреть также базирование по торцу.

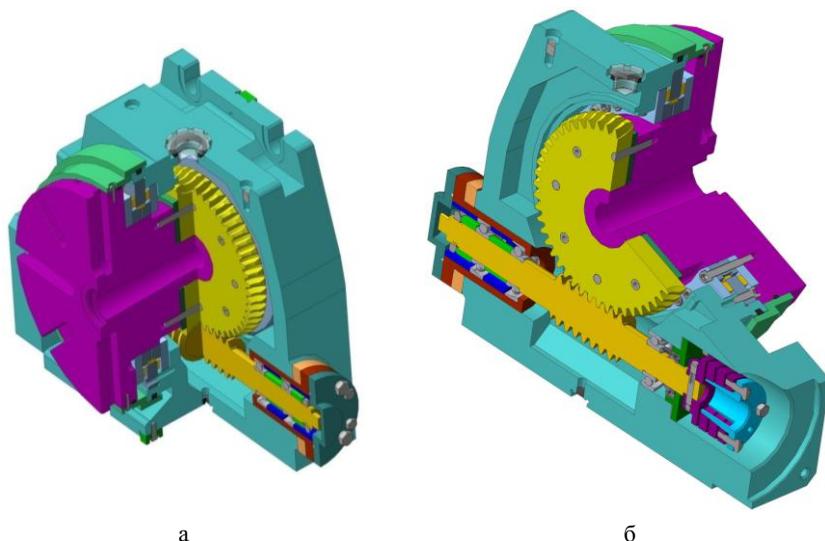


Рис. 1.28. Поворотный стол: а, б – сечения стола

Для обеспечения синхронизации червяка и колеса необходимо реализовать конструкцию беззазорной червячной передачи [13, 14].

Обнуление боковых зазоров в червячном зацеплении возможно путем смещения червяка в направлении, параллельном оси червячного колеса, рис. 1.29.

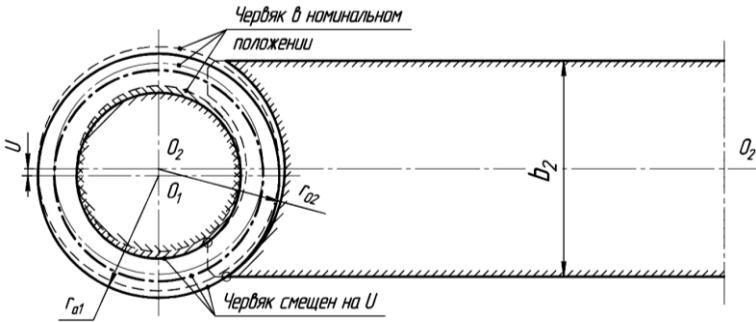


Рис. 1.29. Конструкция передачи с обнулением боковых зазоров

При этом в контакте будут находиться одновременно обе стороны витка червяка с поверхностями двух соседних зубьев червячного колеса. Рассмотрим полученное таким образом беззазорное червячное зацепление в двух аспектах – геометрическом и силовом.

Для определения величины смещения червяка –  $U$ , использована расчетная схема, представленная на рис. 1.30.

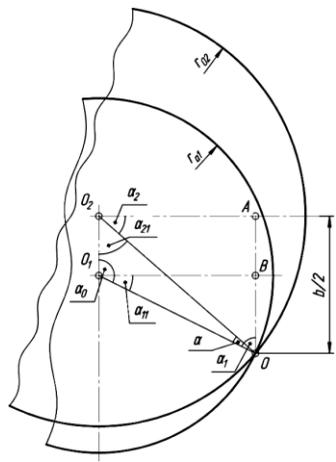


Рис. 1.30. К определению смещения червяка

Для наглядности элементы зацепления – соотношение между радиусами  $r_{a1}$  и  $r_{02} = r_{a1} + \Delta$ , ( $\Delta = 0,2 \cdot m$  – радиальный зазор), даны не

в тех пропорциях, которые имеют место в реальных передачах (величины  $u$  и  $\alpha_1$  были бы практически не различимы).

Известными являются:  $r_{a1} = 0,5 \cdot m \cdot (q + 2)$  – радиус вершин витков червяка;  $r_{o2} = r_{a1} + \Delta = m \cdot [0,5 \cdot (q + 2) + 0,2]$  – радиус дуги окружности, очерчивающей вершины зубьев колеса в осевом сечении;  $b_2 \leq 1,5 \cdot r_{a1} = 0,75 \cdot m \cdot (q + 2)$  – ширина венца червячного колеса; ( $m$  и  $q$  – модуль и коэффициент диаметра червяка).

Из  $\Delta O_2OA$  следует, что

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{b_2 / 2}{r_{o2}} \right).$$

Из  $\Delta O_1BO$ :

$$\alpha_1 = \arccos \left[ \frac{\sqrt{r_{o2}^2 - (b_2 / 2)^2}}{r_{a1}} \right]; \quad \alpha_{11} = \pi / 2 - \alpha_1.$$

Очевидно, что:

$$\alpha_0 = \pi / 2 + \alpha_{11} = \pi - \alpha_1; \quad \alpha_{21} = \pi / 2 - \alpha_2.$$

Из  $\Delta O_2O_1O$ :

$$\alpha = \pi - (\alpha_0 + \alpha_{21}) = \alpha_1 + \alpha_2 - \pi / 2.$$

В результате, из  $\Delta O_2O_1O$ , где известны две стороны –  $r_{a1}$  и  $r_{o2}$ , а также угол  $\alpha$  между ними, находится искомое смещение червяка  $u$ :

$$u = \sqrt{r_{a1}^2 + r_{o2}^2 - 2 \cdot r_{a1} \cdot r_{o2} \cdot \cos \alpha}. \quad (1.1)$$

Расчеты по зависимости (1) для червячных передач с различными параметрами зацепления показали, что

$$u / d_1 \approx 0,02 \dots 0,03,$$

то есть, для образования беззазорного зацепления достаточно предусмотреть возможность смещения червяка параллельно оси колеса на величину  $u$ , равную 2...3% от его делительного диаметра  $d_1$ .

Естественно, что червяк должен находиться в смещенном положении при действии внешних нагрузок. При определенном направлении окружной силы на червяке  $F_{t1}$  червяк будет стремиться вернуться в несмещенное положение (пунктирное изображение на рис. 1.29). Это приведет к появлению зазоров в зацеплении, что нарушит точность синхронизации вращения червяка и колеса. Противодействовать такому смещению могут пружины сжатия, установленные в скользящих опорах вала червяка. Усилия пружин  $F_{II}$  рассчитываются из условия равновесия системы сил, изображенной на рис. 1.31.

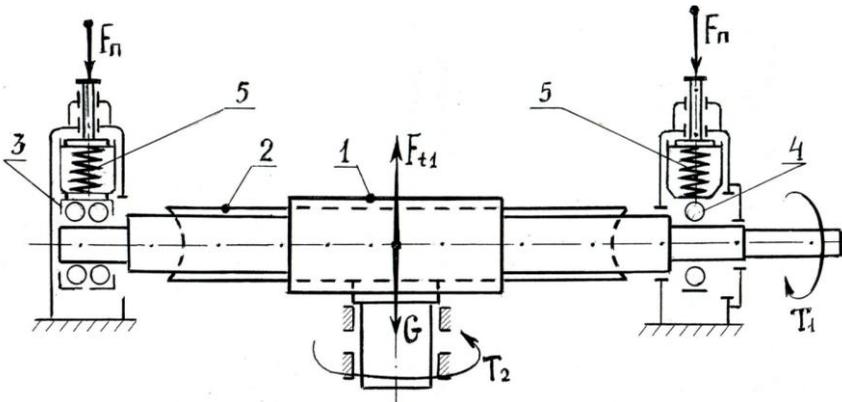


Рис. 1.31. К расчету силы сжатия пружин  $F_{II}$ :

1 – червяк; 2 – червячное колесо; 3 и 4 – подшипники в скользящих опорах вала червяка, которые поджимаются пружинами 5;  $T_1$  и  $T_2$  – вращающие моменты на валах червяка и колеса;  $G$  – вес вала червяка в сборе

3D – представление конструкции поворотного стола со скользящими опорами дает разработанная твердотельная модель (рис. 1.32)

По условию равновесия сил:  $2 \cdot F_{II} + G = F_{t1}$ , откуда

$$F_{II} \geq (F_{t1} - G) / 2, \text{ Н.}$$

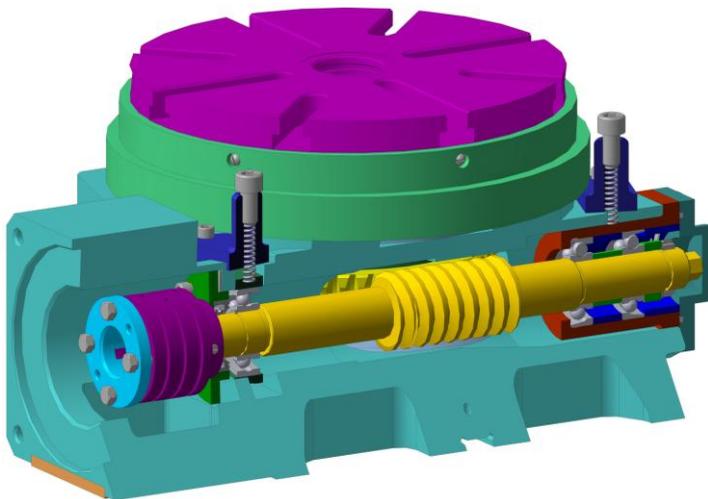


Рис. 1.32. Скользящие опоры червяка поворотного стола

После преобразований, получим

$$F_{II} \geq T_2 \cdot \frac{tg(\gamma + \varphi')}{d_2} - \frac{G}{2}, \text{ Н}, \quad (1.2)$$

где  $d_2 = m \cdot z_2$  – делительный диаметр червячного колеса, м;

$\gamma = arctg(z_1 / q)$  – делительный угол подъема витков червяка, град;

$\varphi'$  – приведенный угол трения в зацеплении, град.

При выводе соотношения (1.2) использован приближенный вариант расчета КПД червячной пары [15, 16]:

$$\eta \approx tg \gamma / tg(\gamma + \varphi').$$

По условию равновесия сил:  $2 \cdot F_{II} + G = F_{I1}$ , откуда

$$F_{II} \geq (F_{I1} - G) / 2, \text{ Н}.$$

После преобразований, получим

$$F_{II} \geq T_2 \cdot \frac{tg(\gamma + \varphi')}{d_2} - \frac{G}{2}, \text{ Н}, \quad (1.3)$$

где  $d_2 = m \cdot z_2$  – делительный диаметр червячного колеса, м;

$\gamma = \arctg(z_1 / q)$  – делительный угол подъема витков червяка, град;

$\varphi'$  – приведенный угол трения в зацеплении, град.

При уточненном варианте расчета КПД сила пружин  $F_{II}$  определяется следующим образом:

$$F_{II} \geq T_2 \cdot \frac{\operatorname{tg} \gamma}{d_2 \cdot \eta} - \frac{G}{2}. \quad (1.4)$$

Здесь, [17]:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \varphi')} - \frac{\pi}{2} \cdot f_{np} \cdot \frac{\varepsilon_S}{z_2},$$

где  $f_{np} = B - C \cdot V_S$  – приведенный коэффициент трения при качении зубьев по виткам,  $B$  и  $C$  – по [17];

$$\varepsilon_S = \sqrt{[0,17 \cdot z_2 + 0,34 \cdot (x+1)]^2 - (0,16 \cdot z_2)^2} - 0,058 \cdot z_2 + 1,01 \cdot (1-x) \quad \text{– коэффициент}$$

перекрытия червячной передачи в средней торцевой плоскости колеса; ( $x$  – коэффициент смещения червяка).

Расчеты показывают, что уточненный вариант (1.3) отличается от приближенного варианта (1.2) не более, чем на 5...6%.

Для станка СВМ1Ф4, где вращение стола осуществляется червячной передачей с параметрами:

$$a_w = 98 \text{ мм}; m = 3,15 \text{ мм}; q = 12,5;$$

$$z_1 / z_2 = 1/50; x = 0; b_2 = 34 \text{ мм},$$

смещение  $u$  и потребная сила пружины  $F_{II}$  принимают значения:

$$u = 0,824 \text{ мм}, \text{ что составляет } 2,1\% \text{ от } d_1 = 39,375 \text{ мм};$$

$$F_{II} \approx 156 \text{ Н}.$$

Расширенный проектировочный расчет червячной передачи (ЧП) осуществим в модуле проектирования механических передач вращения АРМ Trans [18, 19]. При заданной внешней нагрузки, материале червяка и

колеса, типе термообработки определим основные геометрические параметры передачи, силы, действующие в ней, параметры контроля положения боковых поверхностей, а также допуски и посадки в зацеплении (рис.1.33).

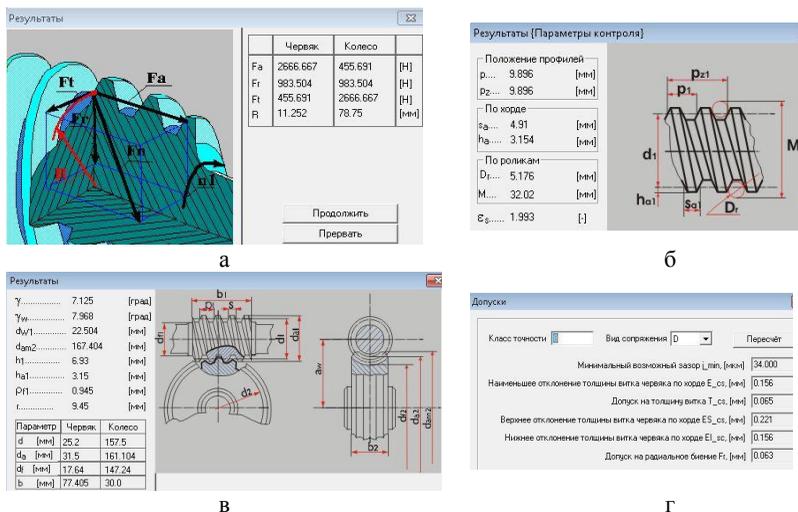


Рис. 1.33. Результаты расчета ЧП в модуле APM Trans:  
 а – силы в зацеплении; б – параметры контроля;  
 в – геометрические параметры; г – допуски в зацеплении

В процессе исследования червячной передачи в APM FEM [7] построена конечно-элементная сетка (рис. 1.34, а), с числом конечных элементов 11515, и количеством узлов для стержневых элементов более, чем 3000. В системе APM FEM каждый конечный стержневой элемент включает два узла, которые имеют 6 степеней свободы. Взаимодействие конечных элементов друг с другом реализовано через их узлы, с учетом которого сформирована матрица жесткости, решение которой сводится к решению системы алгебраических уравнений. Совместным решением системы уравнений являются величины смещений (рис. 1.34, б) и величины напряжений (рис. 1.34, в), Расчет стержневых элементов ведется с учетом всех концентраторов напряжений. Это позволяет более точно определять величины действующих напряжений.

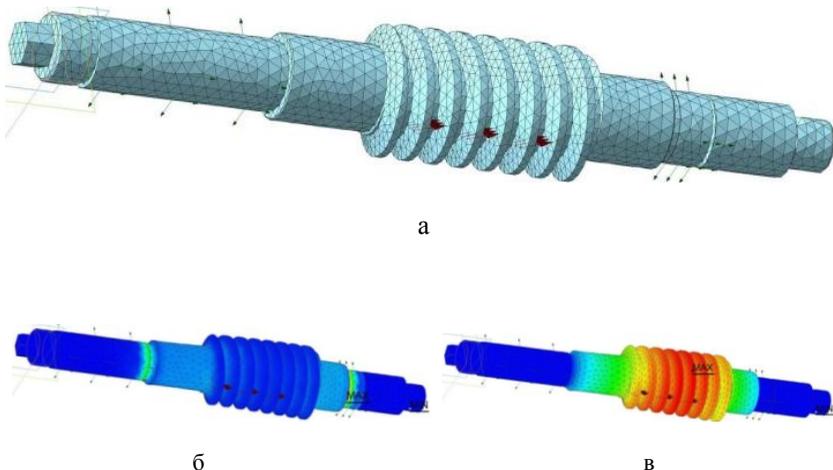


Рис. 1.34. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния червячной передачи:  
 а – конечно-элементная сетка; б – поля напряжений; в – поля перемещений

Полученные 3D-модели обрабатывающего центра и его основных узлов представлены на международном конкурсе «Будущие Асы КОМПьютерного 3D-моделирования», проводимым группой компаний АСКОН (октябрь 2014 г.) Представленный проект стал серебряным призером этого конкурса.

Получены два патента на полезные модели:

- № 95715 «Беззазорна черв'ячна передача»;
- № 99664 «Поворотний стіл металорізального верстата»

Подана заявка на изобретение а 2015 04681 «Поворотний стіл».

### 1.3. 3D-моделирование фрезерно-сверлильного станка с шестишпindelной головкой модели СФ16МФ3

В качестве объекта моделирования рассматривается специализированный вертикальный фрезерно-сверлильный станок второго типоразмера модели СФ16МФ3.

Данный станок используется в условиях мелкосерийного и серийного производства и предназначен для многооперационной обработки изделий

сложного профиля из сталей, чугуна, легких и цветных металлов. На станке может выполняться обработка вертикальных, горизонтальных и наклонных плоскостей, фасонных поверхностей, отверстий, пазов различными технологическими методами: фрезерованием, сверлением, зенкерованием и развертыванием. В интегрированной САПР КОМПАС студентом кафедры МВтаI Журавлевым В.В. построена 3D-модель станка (рис. 1.35), состоящая из 791 твердотельных моделей деталей и 73 сборочных единиц различных узлов и агрегатов станка сборки [20, 21].

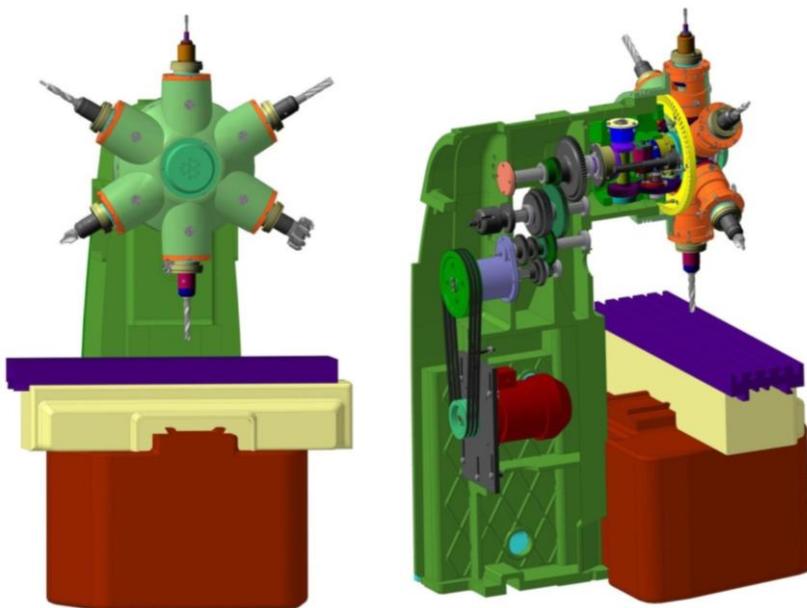


Рис. 1.35. 3D-модель станка модели СФ16МФ3

Разработанный проект в виде 3D-модели станка стал победителем в XII международном конкурсе будущих асов компьютерного 3D-моделирования 2014, проводимым группой компаний АСКОН.

Основные кинематические цепочки представлены на рис. 1.36.

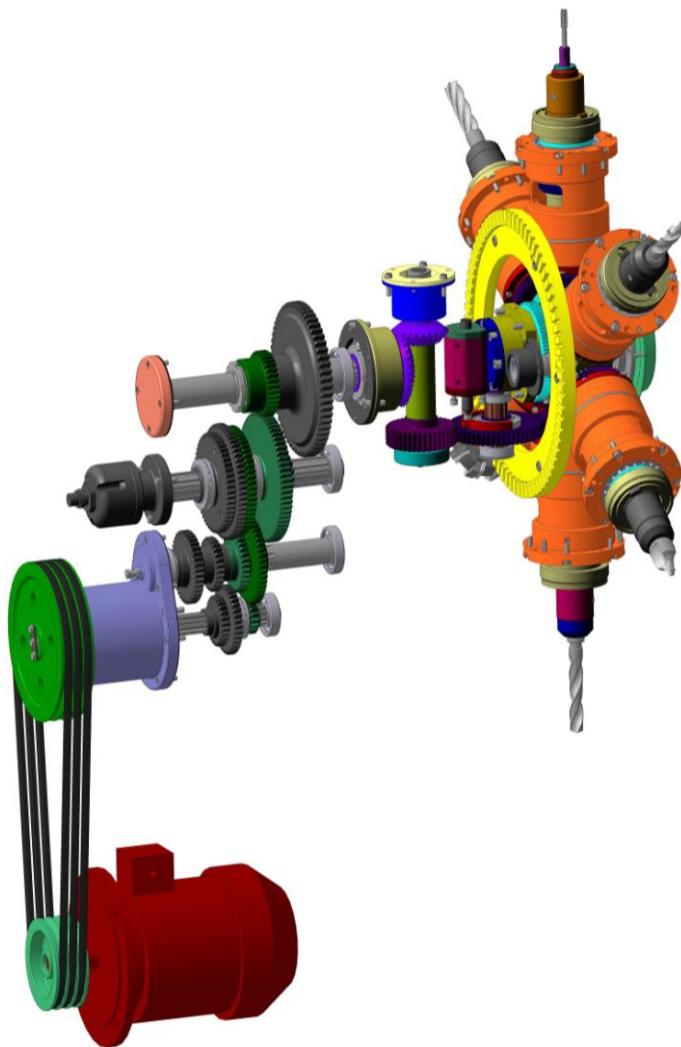


Рис. 1.36. Кинематика станка СФ16МФ3 в 3D

3D-модели отдельных деталей, входящим в сборки различных узлов представлены на рис. 1.37.

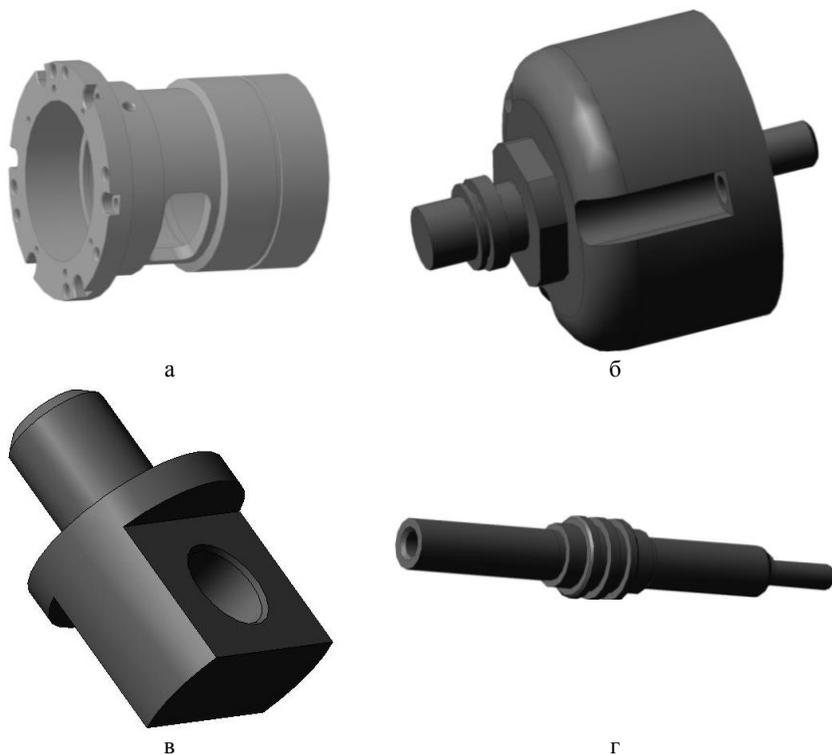


Рис. 1.37. Детали станка СФ16МФ3:  
 а – гильза шпинделя; б – корпус масляного насоса;  
 в – опора; г – шток механизма вращения

### ***1.3.1. Шестишпindelная револьверная головка***

Станок оснащен устройством автоматической смены инструмента, которая осуществляется путем поворота шестишпindelной револьверной головки в нужную позицию по программе. Выбор инструмента осуществляется с помощью специальных кулачков, а поворот головки реализуется посредством зубчатого зацепления с использованием гидродвигателя. Шестишпindelная револьверная головка является альтернативой достаточно дорогостоящему инструментальному магазину со своим приводом. Это справедливо в случае обработки определенной номенклатуры корпусных изделий. При работе станка подвижная часть

револьверной головки фиксируется пакетом тарельчатых пружин с постоянным усилием 20580 Н.

В шестишпindelной револьверной головке, которая представляет собой чугунный корпус, в радиальных расточках которого закрепляется шесть шпindelных узлов (рис. 1.38). На рис. 1.39 представлены ее сечения.

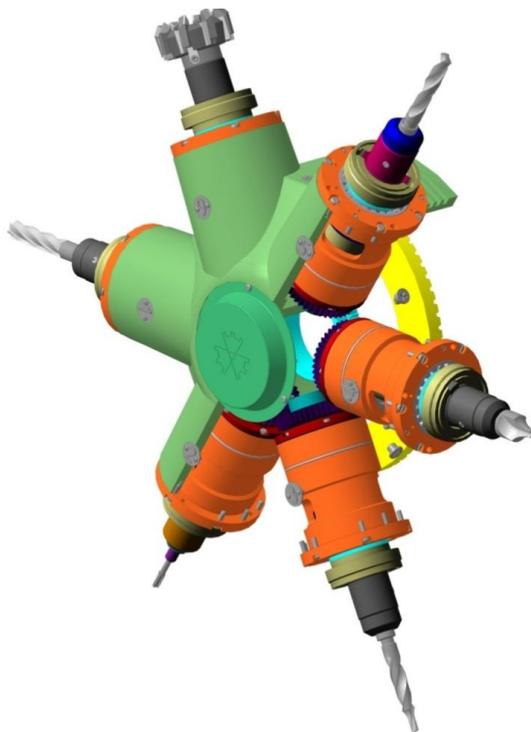


Рис. 1.38. 3D-модель шпindelной головки

В процессе создания данной модели использованы новейшие функциональные возможности САПР КОМПАС и специализированных приложений. При разработке таких сложных деталей как корпус станины с коробкой скоростей и корпус шестишпindelной револьверной головки нашли применения специализированные прикладные библиотеки САПР, что значительно усовершенствовало процесс геометрического моделирования. Использование модуля фотореалистического изображения Artisan Rendering встроенного в КОМПАС формирует соответствующий дизайн и представление о конструкции станка.

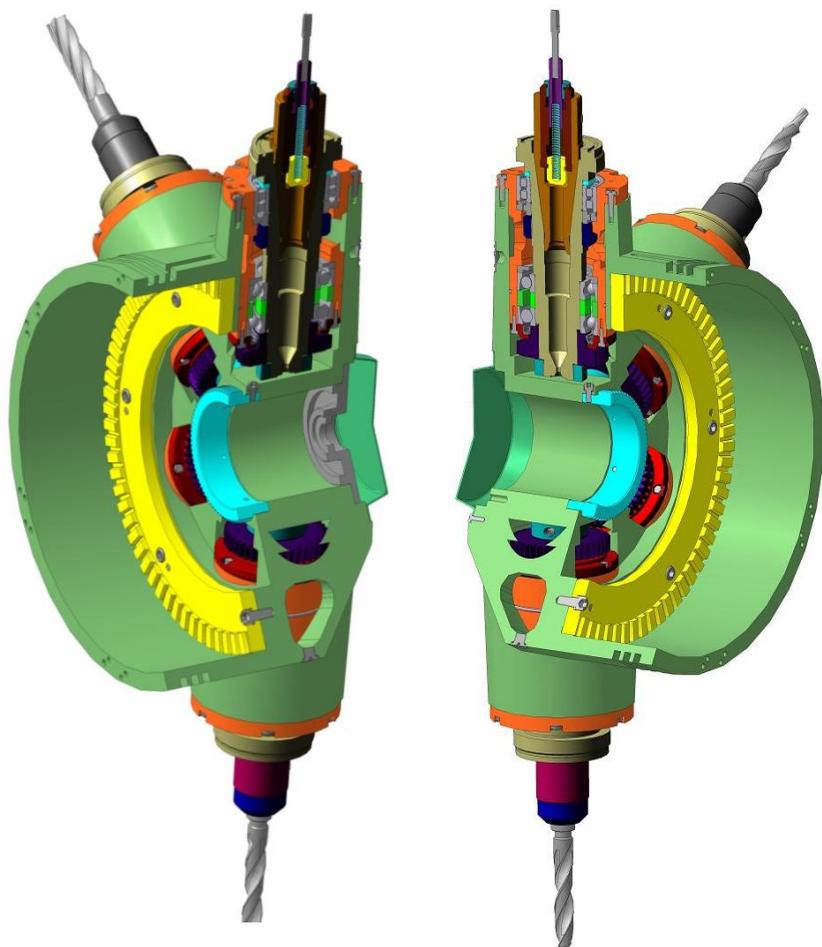


Рис. 1.39. Сечения шпиндельной головки

Станина станка является базовым узлом, на котором монтируются узлы и механизмы станка. Жесткая конструкция станины достигается за счет развитого основания и большого числа ребер. В верхней части корпуса станины смонтирована коробка скоростей с соответствующим механизмом переключения скоростей и механизмом вращения револьверной головкой (рис. 1.40, а; б)

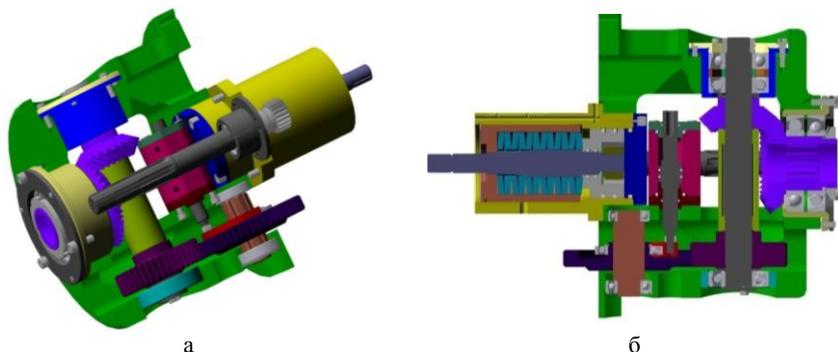


Рис. 1.40. Механизм поворота шестишпindleвой головки:  
а – 3D-сборка; б – сечение

### 1.3.2. Шпиндельный узел

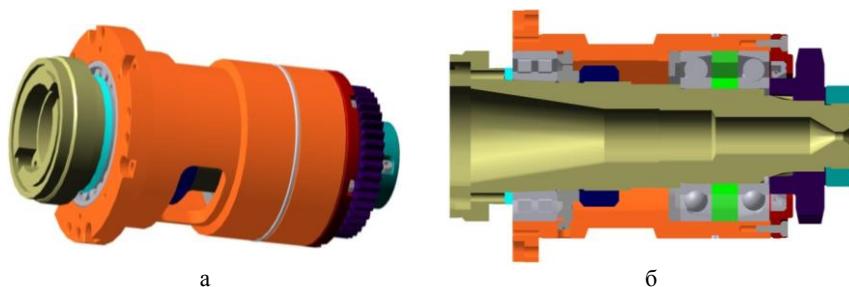


Рис. 1.41. Шпиндельный узел станка СФ16МФ3: а – сборка; б – сечение

Формообразующий шпиндельный узел представляет двухопорную конструкцию [21, 22]. В процессе исследования построена твердотельная модель шпиндельного узла головки (рис. 1.41, а; б). В передней опоре шпинделя установлен высокоточный радиально-упорный двухрядный конический роликовый подшипник, который воспринимает радиальные и двухсторонние осевые нагрузки и характеризуется допустимой радиальной нагрузкой в 1,7 раза выше, чем у соответствующего однорядного подшипника. Кроме этого, он обеспечивает повышенную жесткость опоры. В задней опоре установлены сдвоенные радиально-упорные шарикоподшипники, которые воспринимают радиальные комбинированные

и двусторонние осевые нагрузки, что в свою очередь позволяет применять их в плавающих опорах без фиксирования наружных колец в осевом направлении. Поэтому их эффективно использовать в узлах с большими осевыми усилиями при относительно высоких частотах вращения.

Рендеринг шпиндельного узла выполнен в системе Artisan Rendering, интегрированного в состав КОМПАС-3D (рис. 1.42)



Рис. 1.42. Рендеринг шпиндельного узла

При монтаже задней опоры выбрано Х-образное соединение радиально-упорных шарикоподшипников («лицевыми» сторонами) с использованием предварительного натяга в виде проставочных колец разной ширины. Регулировка колец позволяет уменьшить избыточный нагрев опор. При этом следует увеличить ширину проставочной втулки между внутренними кольцами подшипника (заменить ее) либо уменьшить на величину перешлифовки ширину проставочной втулки между наружными кольцами. В практике станкостроения величина перешлифовки зависит от диаметра отверстия подшипника. Для внутреннего диаметра в диапазоне от 70 до 100 мм – величина перешлифовки составляет порядка 6 мкм.

Технологичность конструкции шпиндельного узла иллюстрируется на рис. 1.43.

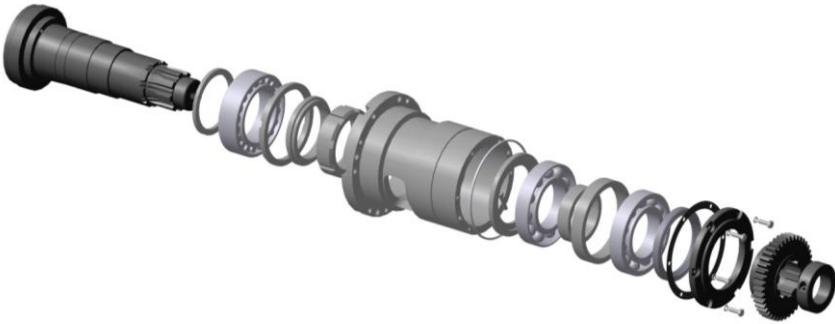


Рис. 1.43. Разнос шпиндельного узла

### ***1.3.3. Моделирование шпинделя в среде APM Structure 3D***

Одним из эффективных средств решения трудоемких проектных заданий по созданию оптимальных машиностроительных конструкций есть модуль APM Structure 3D [7]. Этот модуль предназначен для анализа упруго деформированного состоянию произвольных трехмерных машиностроительных конструкций, которые состоят из стержневых, пластинчатых, оболочковых и объемных элементов в их произвольной комбинации. Расчет выполняется численным методом - методом конечных элементов (МКЭ) и позволяет рассчитывать величины напряжений и деформаций в любой точке конструкции с учетом собственного веса каждого из элементов и с учетом концентраторов напряжений.

Определение неизвестных силовых факторов в каждом из узлов и внутренних силовых факторов в пределах каждого конечного элемента обеспечивает информацию для расчета шлицевых, резьбовых и других соединений.

Рассмотрим задачу моделирования вертикального шпинделя привода главного движения фрезерного станка модели СФ16МФ3. В процессе моделирования в среде APM Structure 3D создается «проволочная» модель конструкции (рис. 1.44), в которой каждый стержень изображен в виде линии, которая располагается по центру веса будущего пересечения.

Каждый стержень имеет конкретные размеры и соединяется с помощью узлов с другими стержнями конструкции шпинделя, твердотельная и каркасная модель которого изображена на рис 1.45, а; б.

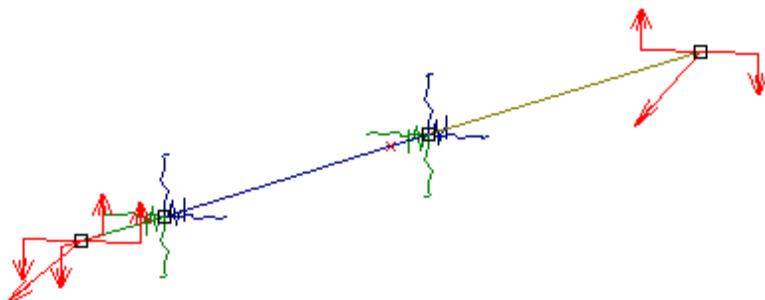
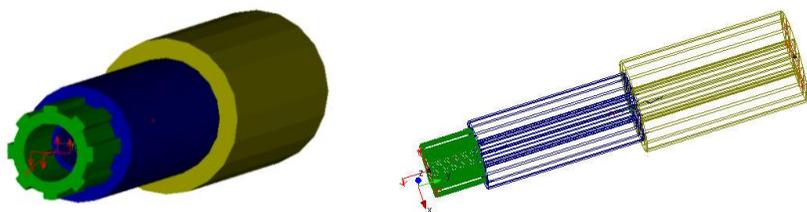


Рис. 1.44. Проволочная модель шпинделя



а.....б

Рис. 1.45. Модели шпинделя в APM Structure 3D:  
а – твердотельная; б – каркасная

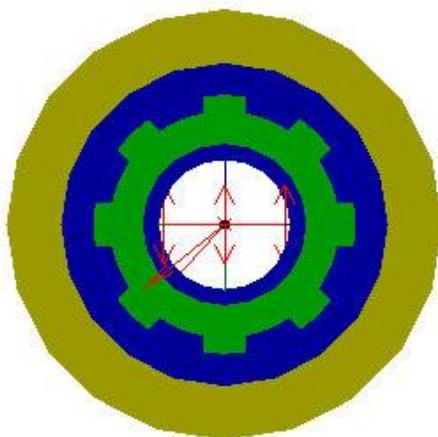


Рис. 1.46. Поперечные сечения шпинделя

Для проведения расчета этой конструкции необходимо дополнительно задать: поперечные сечения каждому из стержней (рис. 1.46); опоры для созданной конструкции, которые определяют ее положение в пространстве; внешние нагрузки, которые действуют на конструкцию (включая собственный вес ее элементов); параметры материала элементов конструкции.

Расчет в среде APM Structure 3D позволяет оценить полную картину напряженно-деформированного состояния вала в любом его сечении, включая оценку нагрузок, силовые факторы и др., представленные в табл. 1.1 – табл.1.6.

Таблица 1.1

**Нагрузки в узлах: (Нагружение 0)**

N	Тип	Номер узла	Проекция			Модуль
			на x	на y	на z	
0	сила, Н	0	-6442.00	0.00	-5187.00	8270.69
1	сила, Н	3	-2355.00	0.00	-2616.00	3519.87

Таблица 1.2

**Перемещения в узлах: (Нагружение 0)**

N	Линейное перемещение [мм]			Угловое перемещение [Град]		
	x	y	z	x	y	z
0	-0.0707	6.56e-038	-0.0576	0.0251	-0.0454	-0.0297
1	-0.0504	6.56e-038	-0.0412	0.0135	-0.00234	-0.0182
2	-0.0226	2.54e-037	-0.0219	-0.000167	0.00946	-0.00135
3	-0.0254	3.1e-021	-0.0293	-0.00428	0.0191	0.00236

Таблица 1.3

**Индекс стержня 0 (Rod 0)**

Узел	Сила [Н]			Момент [Н*м]		
	Fx (осевая)	Fy	Fz	Mx кручение	My	Mz
0	-0.00	5187.00	6442.00	347.00	0.00	-29.00
1	-0.00	5187.00	6442.00	347.00	-289.89	-262.41

Т а б л и ц а 1.4

**Индекс стержня 1 (Rod 1)**

Узел	Сила [Н]			Момент [Н*м]		
	Fx (осевая)	Fy	Fz	Mx (кручение)	My	Mz
1	0.00	1485.91	1894.83	138.92	-121.73	-102.34
2	0.00	1485.91	1894.83	138.92	-390.79	-313.34

Т а б л и ц а 1.5

**Индекс стержня 2 (Rod 2)**

Узел	Сила [Н]			Момент [Н*м]		
	Fx осевая	Fy	Fz	Mx кручение	My	Mz
2	-0.00	-2616.00	-2355.00	347.00	-346.18	-384.55
3	-0.00	-2616.00	-2355.00	347.00	0.00	-0.00

*Общая масса конструкции 7.89 кг;*

*Максимальное перемещение 0.09 мм (Rod 0) (Нагрузка 0).*

Т а б л и ц а 1.6

**Напряжение в стержне (макс.) [МПа] (Нагрузка 0)**

N	Обозначение	Узлы	Экв. напряжение
0	Rod 0	0,1	124
1	Rod 1	1,2	24.7
2	Rod 2	2,3	12.2

*Максимальное напряжение 123,6 МПа (Rod 0) (Нагрузка 0)*

Инструментарий модуля APM Structure 3D позволяет выполнить комплексный расчет шпинделя станка СФ16МФ3. На рис. 1.47 изображенные эпюры моментов изгиба (рис. 1.47, а) и поперечных сил (рис. 1.47, б)

Упруго-деформированное состояние в произвольном сечении шпинделя позволяет определить метод конечных элементов (МКЕ). С помощью метода МКЕ построены поля напряжений и поля перемещений шпинделя (рис. 1.48, а, б, в)

Анализ полученных результатов позволяет выбрать наилучшие конструктивные решения, работая с разными нагрузками и их комбинациями. При этом, появляется возможность проектировать

конструкции близкие к равнопрочным по критериям прочности, жесткости, и виброустойчивости.

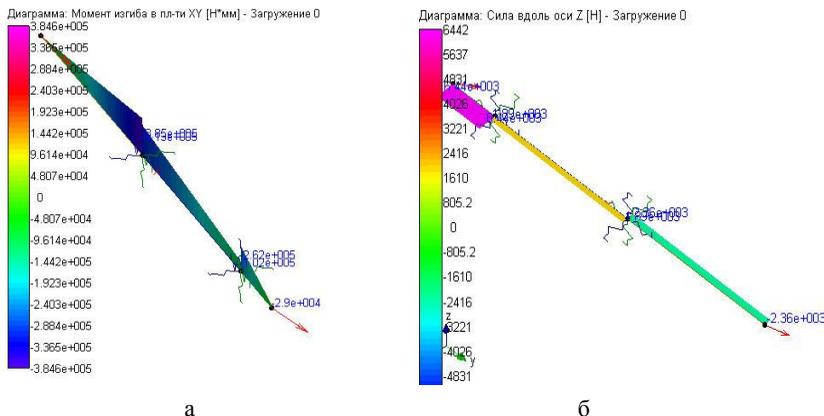


Рис.1.47. Результаты прочностного расчета:  
а – эпюры изгибающих моментов; б – эпюры поперечных сил

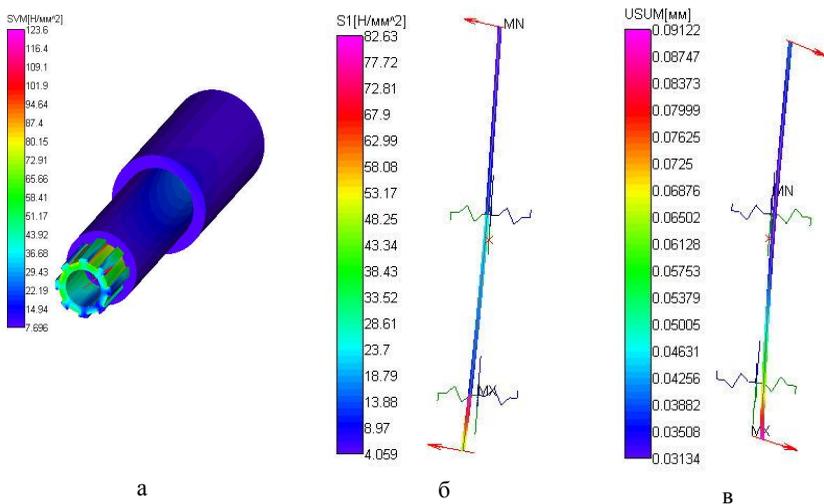
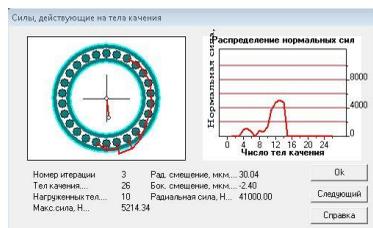


Рис. 1.48. – Выходные характеристики шпинделя:  
а – поля эквивалентных напряжений; б – поля главных напряжений;  
в – поля перемещений

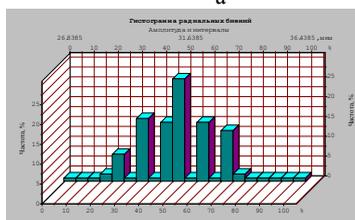
Комплексный расчет роликового двухрядного радиального подшипника 3182116 ГОСТ 7634-75) осуществим в модуле APM Bear [23]. В этом модуле реализован новый подход к расчету подшипников, в котором учитывается существенно статистическая природа процессов, вызванная наличием погрешности формы поверхностей в реальном контакте между телами качения и дорожками качения. Амплитуда этих погрешностей сопоставима с величиной контактных перемещений, что делает, в этом случае, непригодными классические методы решения контактной задачи.

В APM Bear рассчитывается выборочная реализация контактных перемещений подшипника, состоящая из 100 элементов. Используя эту реализацию можно определить средние значения перемещений и жесткости, их дисперсии, максимальные, минимальные и наиболее частые значения, форму полей рассеивания и т.д.

Средняя долговечность	2511	час
Максимальное контактное напряжение	1285	МПа
Выделение тепла	59628	Дж/с
Динамическая грузоподъемность	127831	Н
Радиальные биения	31.478	мкм
Боковые биения	0.216	мкм
Момент трения	0.989	Н × м
Потери мощности	16.564	Вт

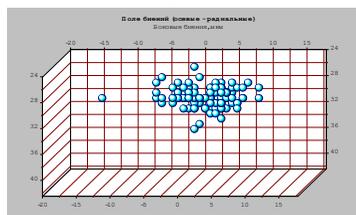


а



в

б



г

Рис. 1.49. Результаты расчета передней опоры шпинделя:  
 а – расчетные параметры; б – распределение нормальных сил;  
 в – гистограмма радиальных биений; г – поле биений (осевые-радиальные)

В результате выполнения комплексных расчетов получены значения расчетных параметров передней опоры шпинделя на наиболее нагруженном роликовом двухрядном подшипнике 3182116 ГОСТ 7634-75 (рис. 1.49, а),

распределение нормальных сил для одного из вариантов (итерация № 3) виртуального положения центра подшипника (рис. 1.49, б), гистограмму радиальных биений (рис. 1.49, в) и поле комбинированных осевых и радиальных биений (рис. 1.49, г).

Согласно расчетам, перемещения в передней опоре (при фиксированной жесткости  $j = 98000$  Н/мм) приближаются к допустимым значениям. Вместе с тем, наличие деталей, обеспечивающих осевую фиксацию (распорные втулки, кольца) повышают жесткость шпиндельного устройства, что позволяет считать рассматриваемый вариант конструкции удовлетворяющим критерию жесткости.

#### **1.4. 3D-моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра модели МЦ200**

Превалирующие операции чистовой обработки на высоких скоростях резания определяют комплекс расчетных процедур, основными из которых являются процедуры оценки жесткости и виброустойчивости формообразующих узлов в различных средах автоматизированного проектирования.

В данной работе предложена комплексная процедура оценивания жесткости шпиндельного узла ОЦ фрезерно-сверлильно-расточного типа модели ОЦ 200 в средах САПР КОМПАС и АРМ WinMachine [24, 25]

Для анализа конструкции шпиндельного устройства по критерию жесткости и проведения его комплексного расчета необходимо построить твердотельные модели, используя САПР КОМПАС 3D V14. Воспользуемся принципом «снизу вверх» т.е. вначале построим 3D-модели, составляющих деталей (корпус, фланец, полумуфта, гайка и др.) с последующим их объединением в сборочную конструкцию узла. Для создания сборочной конструкции шпиндельного устройства, состоящего из 149 деталей (26 оригинальных, 31 стандартизированных) разработаны твердотельные модели (рис. 1.50).

Крупные объемы информации: табличные и текстовые данные, параметрические модели и рисунки делает целесообразным использование хорошо организованных баз данных. Весьма эффективным являются инструментарий АРМ Base [26, 27], который обеспечивает единую информационную среду САПР. Такой модуль предоставляет широкие возможности по модификации предоставляемых баз или создания пользовательских баз данных.

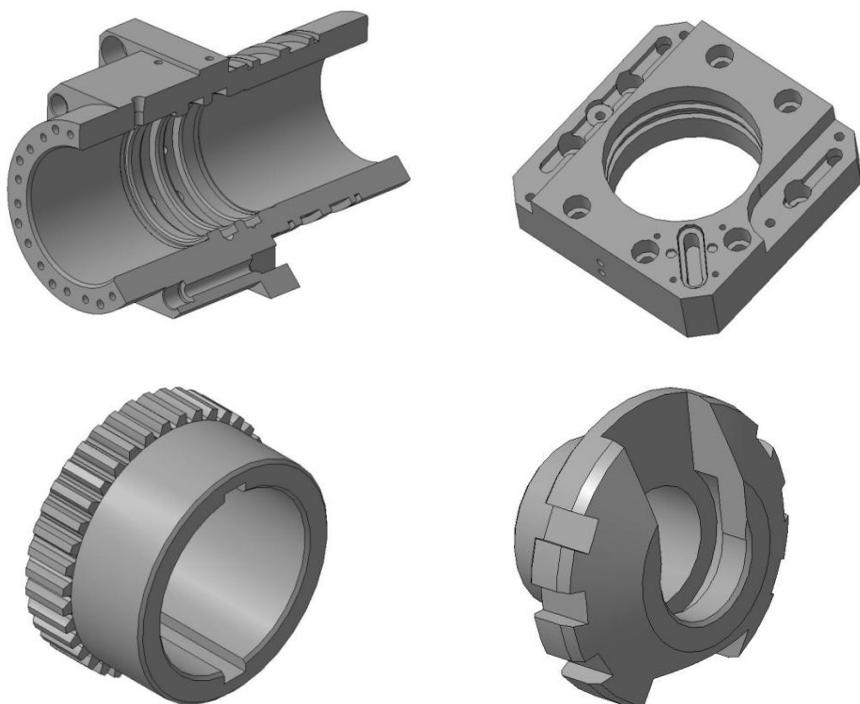


Рис. 1.50. 3D-модели деталей шпиндельного узла

На базе разработанных твердотельных моделей отдельных деталей создана 3D-модель сборочной конструкции шпиндельного устройства (рис. 1.51), реалистичность которой достигнута благодаря модулю Photo360 [28, 29]. В этом модуле имеется возможность наложения текстур подобных реальным; при этом либо используется имеющаяся библиотека структур или создается своя собственная. На рис. 1.52 показано сечение шпиндельного узла.

Для оценки технологичности сборки конструкции эффективно использовать средства анимации САПР. Применяя проект анимации, как пошаговую стратегию, состоящую из последовательности комбинаций шагов (каждый из которых представляет собой действие одного или нескольких компонентов механизма в пространстве в соответствии с законом движения) построена анимация сборки шпиндельного устройства ОЦ 200 (рис.1.53).



Рис. 1.51. Твёрдотельная 3D-модель шпиндельного устройства ОЦ 200

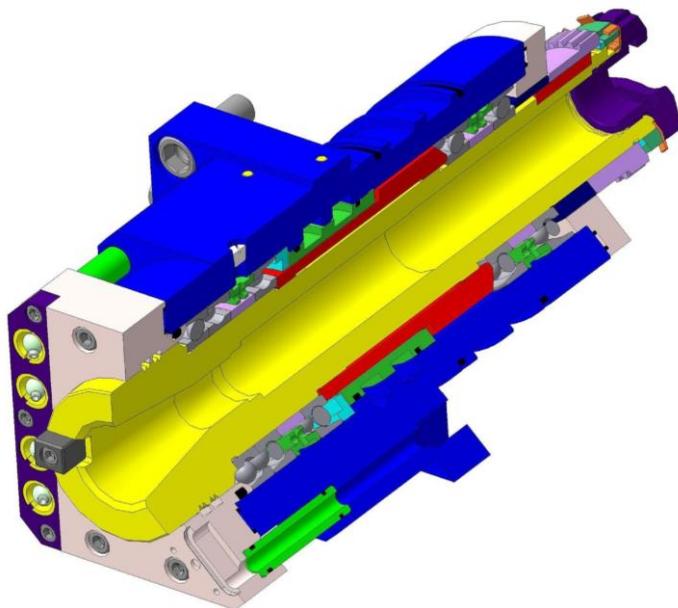


Рис. 1.52. Сечение шпиндельного узла

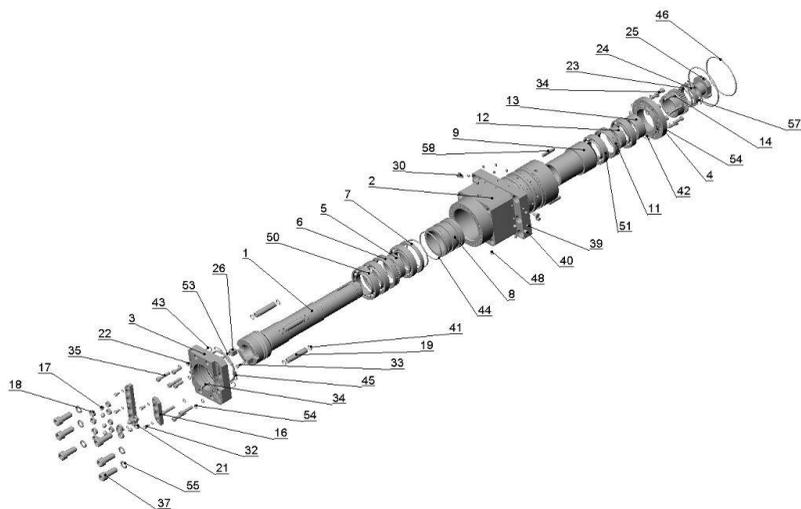


Рис. 1.53. Анимация сборки шпиндельного устройства ОЦ 200

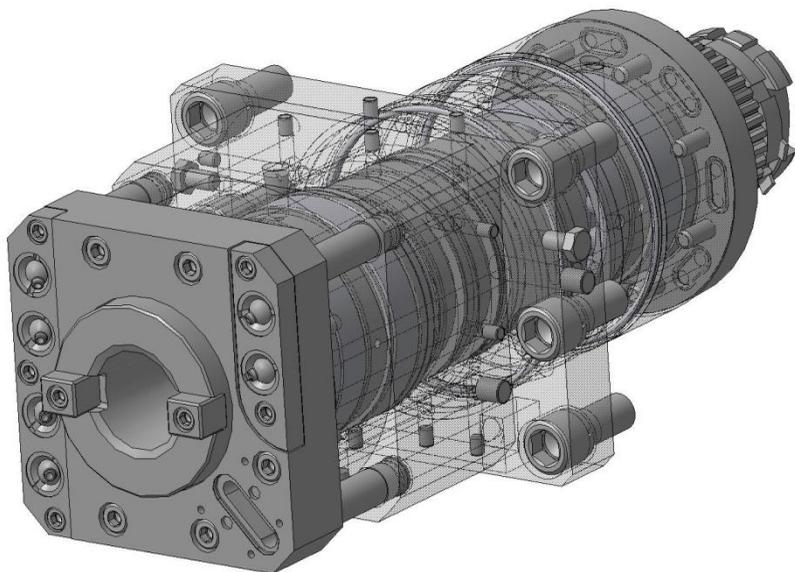


Рис. 1.54. Сетчатая полупрозрачная конструкция шпиндельного узла

Начиная с 9-й версии КОМПАС используется механизм расчета и отображения полупрозрачных объектов в двух вариантах – сетчатой или реалистичной [30, 31]. При этом, при использовании сетчатой прозрачностью отображение перекрытых объектов всегда будет правильной. При редактировании компонента (детали или узла сборки) в контексте сборки существует несколько вариантов для отображения прозрачности компонента. Эти настройки затрагивают только те компоненты, которые не редактируются в текущий момент. На рис. 1.54 представлена конструкция шпиндельного узла в сетчатом полупрозрачном виде.

Основным лимитирующим фактором, определяющим работоспособность шпиндельного узла, является его жесткость [32, 33]. Для оценки ее характеристик использован модуль проектирования валов и осей APM Shaft [1, 18, 34]. Этот модуль оперирует специальным набором примитивов, к которым относятся основные элементы конструкции шпинделя (рис. 1.55).

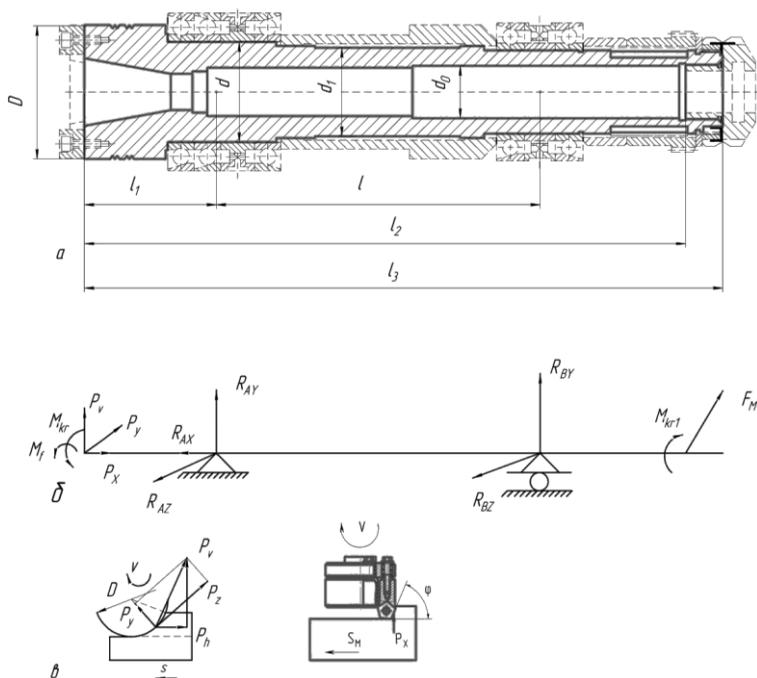


Рис. 1.55. Схема шпиндельного узла:  
 а – конструктивная схема; б – расчетная схема; в – силы резания

В результате расчетов напряженно-деформированного состояния по методу Мора были оценены перемещения шпиндельного узла под действием сил резания и силе, которая может возникнуть в зубчатой муфте в случае несоосности валов. Был просчитан самый сложный случай, когда сила резания и сила, действующая в кулачковой муфте действуют в одном направлении. На рис. 1.56 представлены эпюры перемещений шпинделя.

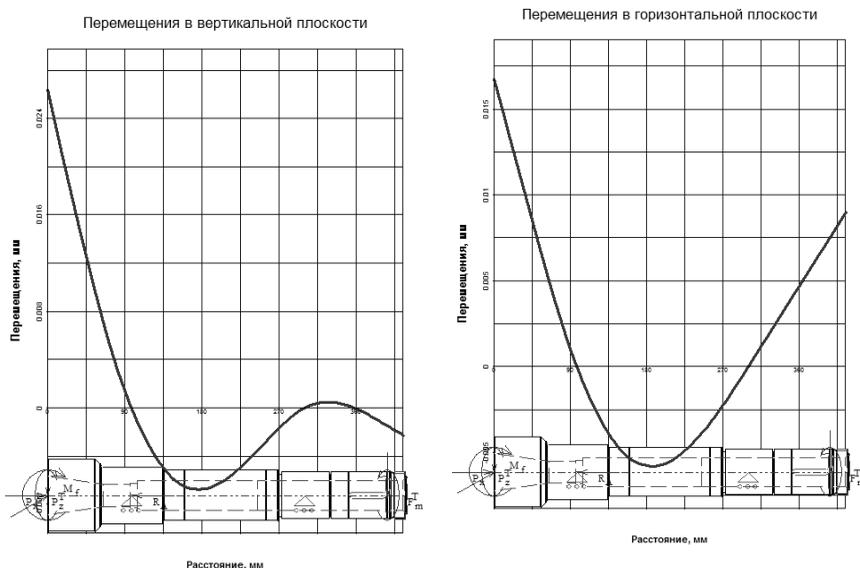


Рис. 1.56. Перемещения шпинделя в вертикальной и горизонтальной плоскостях

В результате расчетов напряженно-деформированного состояния по методу Мора были оценены перемещения шпиндельного узла под действием сил резания и силе, которая может возникнуть в зубчатой муфте в случае несоосности валов. Был просчитан самый сложный случай, когда сила резания и сила, действующая в кулачковой муфте действуют в одном направлении

Суммарный прогиб находится за формулой:

$$y_{\Sigma} = \sqrt{y_c^2 + y_e^2} = \sqrt{0,017^2 + 0,027^2} = 0,031 \text{ мм.}$$

При допустимом прогибе равным 0,04 мм можно утверждать, что необходимая жесткость обеспечивается.

Приведенная упругая линия шпинделя соответствует расчетной схеме с жесткими опорами. Учет податливости опор [35] несколько изменяет картину напряженно-деформированного состояния, характеристики которого представлены в табл. 1.7

Таблица 1.7

**Сводная таблица характеристик жесткости шпинделя**

Коорд. сечения, мм	Перемещения, мм						Углы изгиба, град			
	неподвижная опора			упругая опора			доп.	неподв. опора	упругая опора	допустим.
	верт.	гор.	сумм.	верт.	гор.	сумм.		сумм.	сумм.	
0	0,027	0,017	0,031	0,075	0,084	0,113	0,04	0,022	0,045	0,06
98	-	-	-	0,017	0,041	0,044		0,012	0,036	

Согласно расчетам, перемещения в передней опоре на трех радиально опорных подшипниках (при фиксированной жесткости  $j = 98000$  Н/мм [34]) незначительно превышают допустимые. Вместе с тем, наличие деталей, обеспечивающих осевую фиксацию (распорные втулки, кольца) повышают жесткость шпиндельного устройства, что позволяет считать рассматриваемый вариант конструкции удовлетворяющим критерию жесткости.

---

---

## 2. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

### 2.1. Ременные передачи

В приводах главного движения металлорежущих станков с ЧПУ и обрабатывающих центрах применяются приводы с двигателем постоянного тока и тиристорным преобразователем напряжений. Приводы такого исполнения нуждаются в двухзонном регулировании. Так, для двигателя постоянного тока серии 2П диапазон регулирования по частоте вращения шпинделя составляет всего 1:4. Зачастую по технологическим требованиям этот диапазон необходимо увеличивать, что осуществляется вводом дополнительной коробки скоростей и ременной передачи.

Существует ряд преимуществ, характерных для различных типов ременных передач. Прежде всего, это малозумность, плавность и компенсация перегрузок в режиме пуска (клиноременные (рис. 2.1, а) и поликлиновые (рис. 2.1, б) передачи). 3D-модели построены в интегрированной САПР КОМПАС-3D [36, 37].

Все большее количество металлорежущих станков ориентируется на зубчатые ременные передачи, которые характеризуются возможностью сохранения передаточного отношения при изменении внешней нагрузки и достаточно высоким КПД. Зубчатые ремни имеют наибольшее количество конструктивных вариаций по сравнению с плоскими, круглыми и клиновыми ремнями. Они имеют ряд преимуществ, обеспечивая более плавную работу передачи, исключая вероятность проскальзывания относительно шкива; при этом они создают не столь высокую нагрузку на валы и подшипники от натяжения ременной передачи и обеспечивают наиболее высокий коэффициент полезного действия.

На рис. 2.2 показана 3D-модель зубчатой ременной передачи, в приводе главного движения многооперационного станка модели СФ68 [38].

Имеется ряд идей, связанных с совершенствованием ременной зубчатой передачи [39, 40]. Получены патенты на полезные модели:

1. Передача зубчатым ремнем № 99663 от 10.06.2015;
2. Передача зубчатым ремнем № 100880 от 10.08.2015.

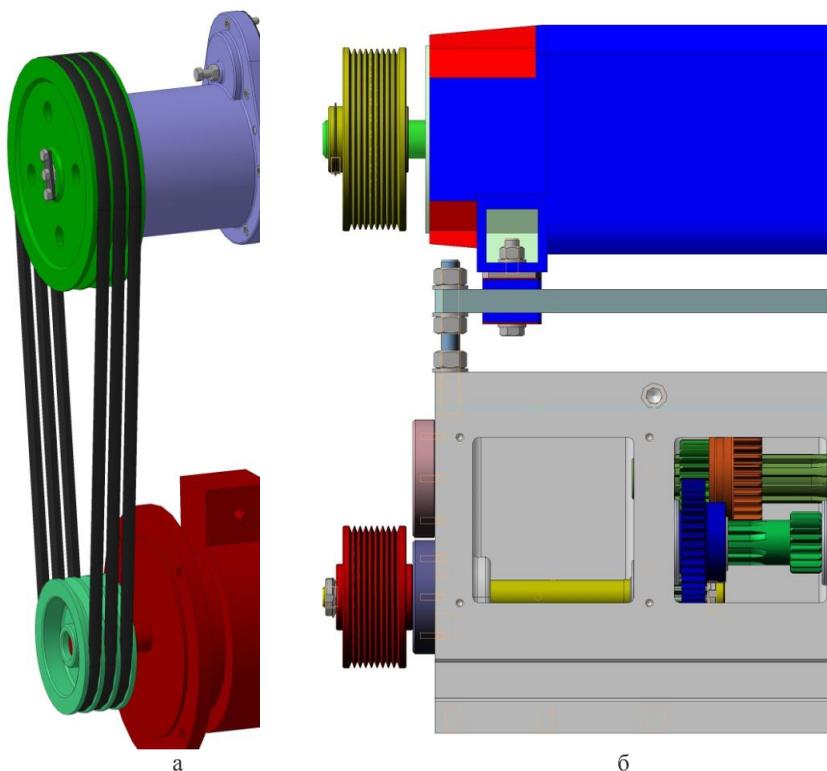


Рис. 2.1. Ременные передачи:  
 а – клиноременная; б – поликлиновая

Недостатком традиционной зубчатой ременной передачи является деформация зубов ремня при входе их в зацепление, наличие фланцев на торцах шкивов и повышенное влияние точности изготовления профиля зубьев на распределение нагрузки по высоте зубов.

Уменьшение уровня деформации в передаче зубчатым ремнем достигается использованием ремней (рис. 2.3, а; б) и шкивов (рис. 2.3,в) с зубьями трапецидального профиля в нормальном сечении (рис. 2.3,г), а в продольном направлении они выполнены в виде шевронов. Шевроны шкивов разделены кольцевой канавкой на два полушеврона с углом наклона  $\alpha$ . При этом ширину зубчатого ремня  $b$  определяют по критерию тяговой способности ремня.

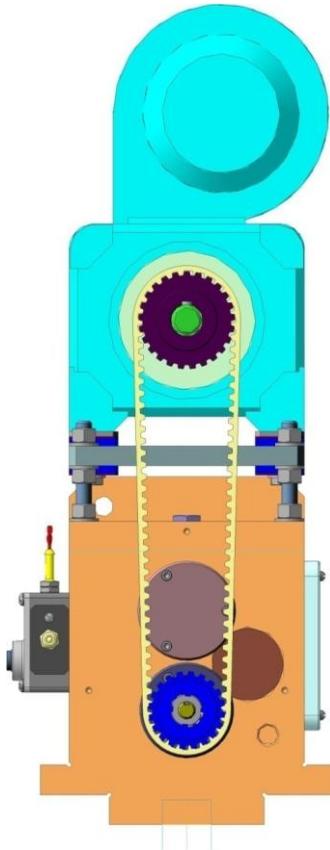


Рис. 2.2. Зубчатая ременная передача

Наличие кольцевой канавки позволяет исключить контакт зубьев шкива с рабочими участками зубьев ремня, где их левые полушевроны пересекаются с правыми полушевронами – закругления радиусом  $r \approx 0,2 \cdot m$ , ( $m$  – модуль зацепления, мм). Пропорции между параметрами профилей зубьев ремня и шкивов совпадают.

Использование передачи с таким расположением зубов на ремне и шкивах предотвратит поперечном сползание ремня со шкивов, что позволит исключить фланцы из конструкции шкивов и, в конце концов, уменьшить потери на трение и повысить нагрузочную способность передачи зубчатым ремнем.

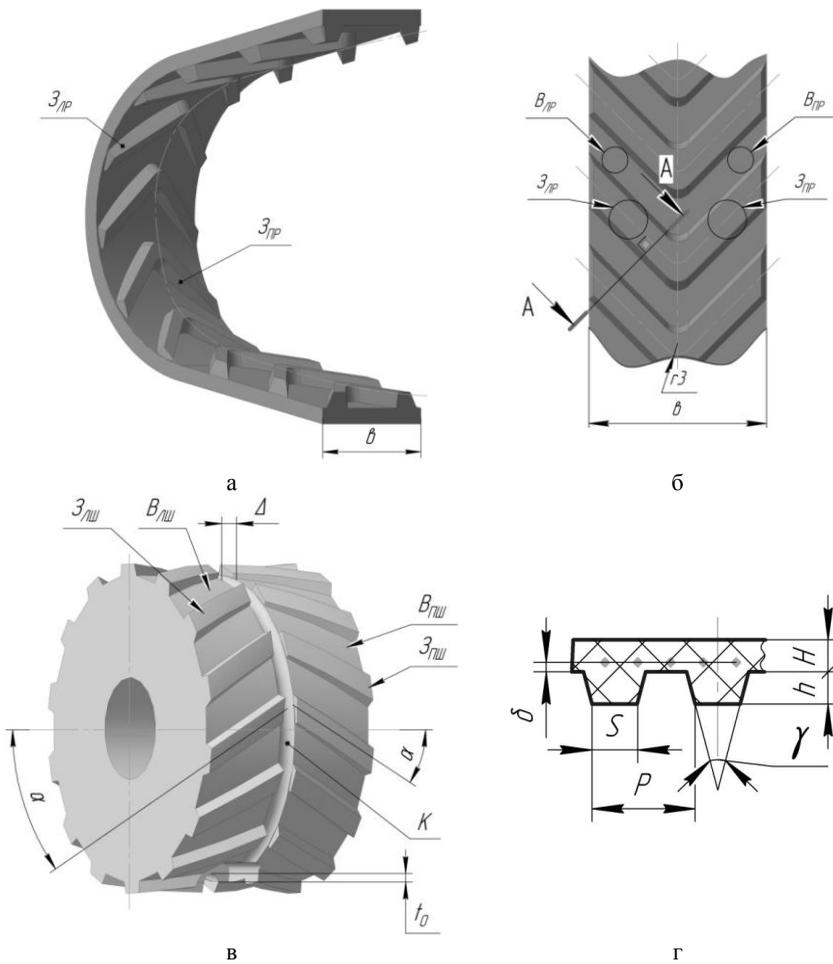


Рис. 2.3. Зубчатая ременная передача с шевронным профилем:  
 а, б – ремень зубчатый шевронный; в – шкив зубчатый шевронный;  
 г – поперечное сечение зубов в нормальном сечении

Повышение работоспособности зубчатой ременной передачи при повышенных нагрузках обеспечивается применением ремней на внутренней поверхности которых (рис. 2.4, а; б) и шкивов, на наружной поверхности которых (рис. 2.4, в) размещены зубья, выполненные в виде арок с углом наклона на торцах шкивов  $\alpha = (\pi / 6) \dots (\pi / 4)$  [3].

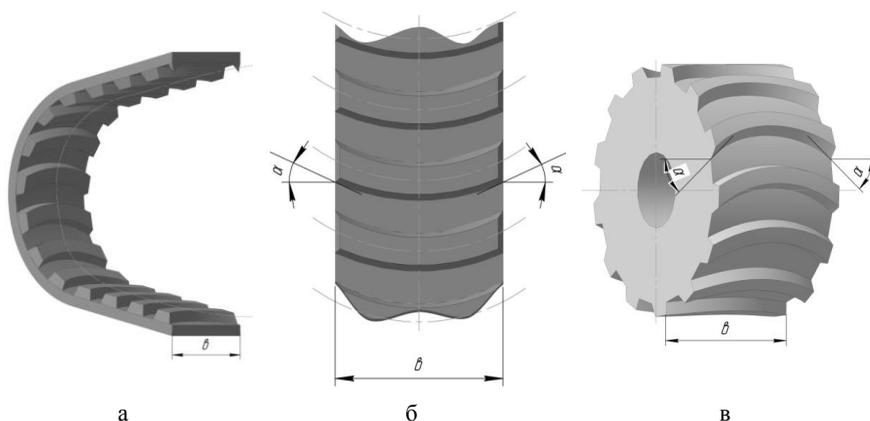


Рис. 2.4. Передача зубчатая ременная с арочными зубьями:  
 а, б – ремень с арочными зубьями; в – шкив с арочными зубьями

Разнообразный парк металлорежущего оборудования оснащается различными типами и конструкциями ременных передач. Это приводит к увеличению трудоемкости процесса проектирования работоспособных вариантов конструкций. Одним из способов повысить производительность процедур проектирования связан с использованием инструментария параметризации и твердотельного моделирования. Сформированные параметрические модели передач позволят рационализировать процесс конструирования в 2D-редакторе и моделирования в 3D-редакторе системы APM WinMachine [31].

Для построения параметрических моделей используется 2D-графический редактор APM Graph, который входит в качестве модуля в САПР APM WinMachine [34]. В этот модуль реализуется собственное программное обеспечение для создания чертежно-графического параметрического редактора. Для широкой гаммы шкивов ременных передач разработаны расчетные формуляры, которые используются в окнах переменных модуля APM Graph [41].

Графический контур шкива, полученный на базе параметрической модели может послужить базой для последующего создания чертежа шкива клиноременной передачи в модуле APM Graph (рис. 2.5), а также 3D – модели в модуле APM Studio [18]. Аналогичная процедура осуществляется и для поликлиновой передачи (рис. 2.6).

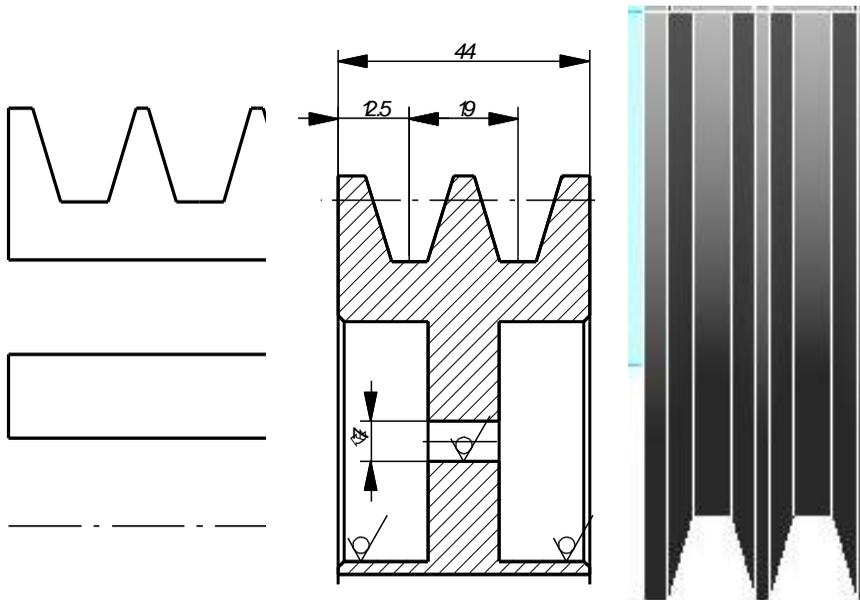


Рис. 2.5. Шкив клиноременной передачи:  
 а – фрагмент параметрической модели; б – фрагмент чертежа;  
 в – фрагмент 3D-модели

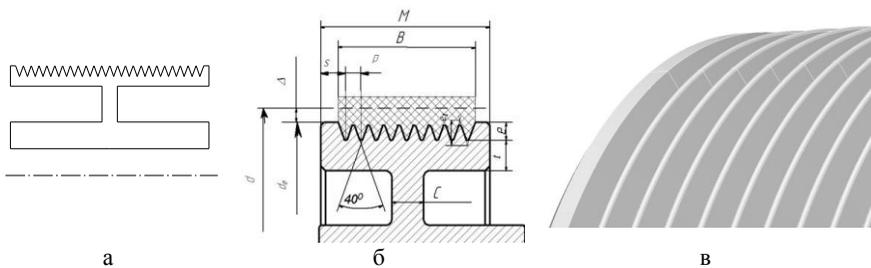


Рис. 2.6. Шкив поликлиновой передачи:  
 а – фрагмент параметрической модели; б – фрагмент чертежа;  
 в – фрагмент 3D-модели

### 2.1.1. Проектирование зубчатременной передачи в системе КОМПАС

Для построения шкива необходимо предназначена команда *Построение модели* с последующим выбором в окне КОМПАС – SHAFT 2D пиктограммы *Новая модель* и одного из типов отрисовки (например, *В разрезе* (рис. 2.7))

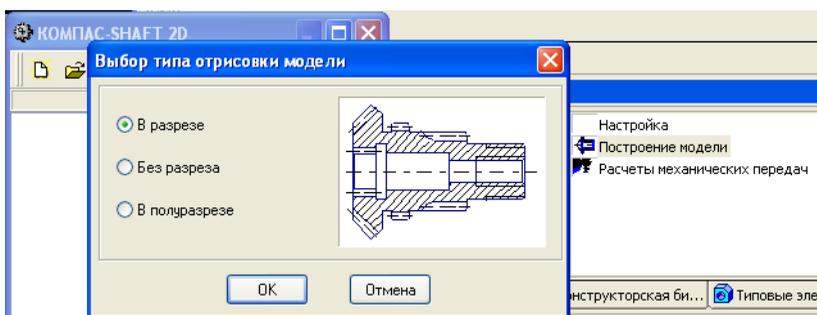


Рис. 2.7. Выбор типа отрисовки шкива

В основном окне КОМПАС – SHAFT 2D осуществляется выбор типа ступеней детали, элементов механических передач, дополнительных элементы ступеней (рис. 2.8).

Для генерации 3D-модели используется команда с соответствующим названием. С ее помощью осуществляется генерация трехмерной модели шкива. (рис. 2.9)

С помощью дополнительных команд осуществляется генерация сечений и видов слева и справа.

Интегративные свойства САПР КОМПАС обеспечивает команда *Механические свойства материалов проектируемых деталей*, при выборе которой подгружается модуль выбора материалов. Работа с этим модулем возможна в виде выбора из предлагаемой базы данных материал детали, либо в виде ручного добавления нового материала в базу данных. При этом материал можно взять из справочника «Люцман: Материалы и сортаменты»

Построение модели шкива зубчатременной передачи. Выполним построение шкива со следующими параметрами: модуль  $m = 7$  мм; число зубьев  $z = 26$ ; ширина обода шкива  $b = 32$  мм.

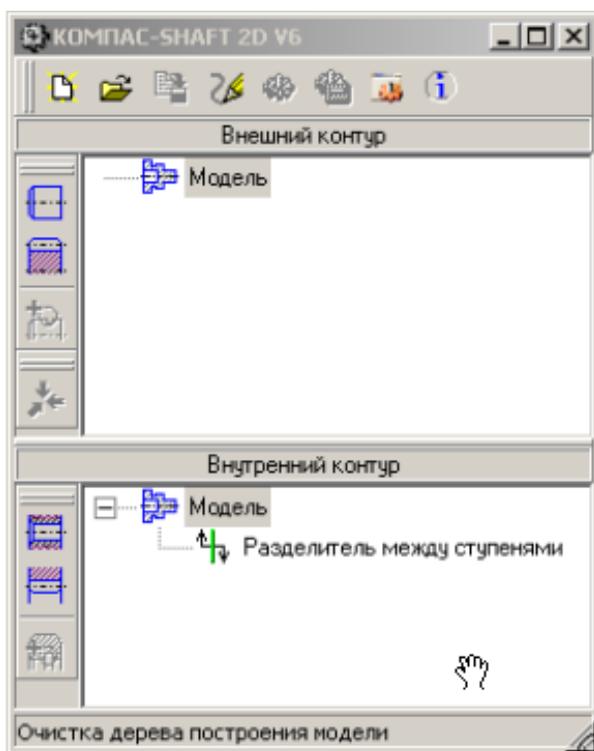


Рис. 2.8. Основное окно диалога КОМПАС – SHAFT 2D

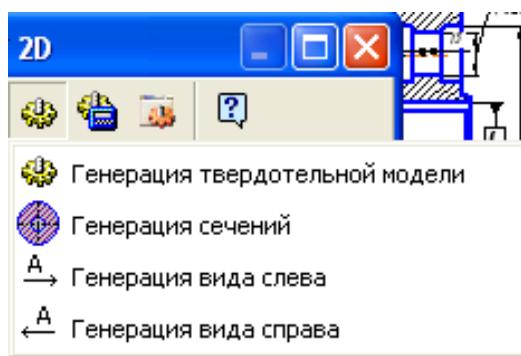


Рис. 2.9. Окно генерации 3D-моделей

В диалоговом окне построения внешнего контура с помощью пиктограммы *Элементы механических передач* выбирается тип передачи: *Шкив зубчатременной передачи* (рис. 2.10). В этом окне можно выбрать опцию *Размеры* для автоматической простановки размеров на чертеже.

В диалоговом окне *Расчет зубчатой ременной передачи* (рис. 2.11) реализуется проектный расчет передачи. Ввод исходных данных реализуется в окне *Проектного расчета* (рис. 2.12).

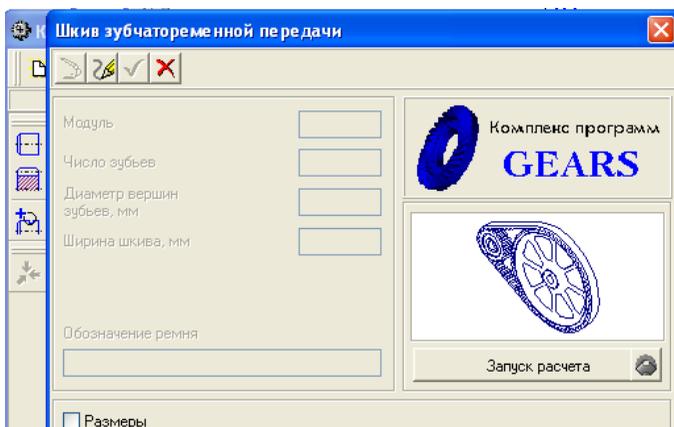


Рис. 2.10. Диалоговое окно «Шкив зубчатременной передачи»

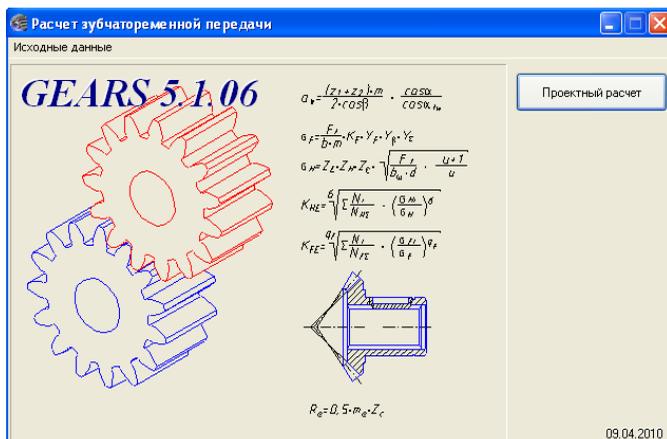


Рис. 2.11. Окно расчета зубчатой ременной передачи

В окне ввода данных (рис. 2.12) задается модуль шкива, который является основной расчетной величиной при определении размеров зубьев, при подборе режущего инструмента и настройке станков. Значения нормальных модулей для передач зубчатым ремнем определяются отраслевым стандартом ОСТ 38-05114-76 и выбирается из выпадающего контекстного меню. После ввода исходных данных осуществляется *Расчет* (рис. 2.12) и запись полученных проектных данных в отдельном документе.

Параметры	
1. Требуемая мощность, кВт	10
2. Частота вращения малого шкива, об/мин	1450
3. Профиль зуба ремня	трапециевидальный
4. Ролики внутри контура	<input type="checkbox"/>
5. Ролик снаружи контура	<input type="checkbox"/>
6. Коэффициент динамичности нагрузки	1.1
7. Модуль ремня, мм	7
8. Передаточное число	2
9. Число зубьев малого шкива	26

Рис. 2.12. Окно ввода исходных данных

Система КОМПАС – SHAFT 2D позволяет реализовать многовариантные расчеты зубчатоременных передач. Для конкретного варианта (рис. 2.13), соответствующего выше представленным исходным данным, осуществляется расчет и в окне *Выбор объекта построения* (рис. 14) строятся внешний и внутренний контуры. В поле чертежа будет начерчен шкив с шириной зубчатого венца 32 мм и диаметром окружностей вершин зубьев 180,566 мм.

Для изображения профиля зубьев шкива используется опция *Дополнительные элементы ступеней* → *профиль зубьев*. На поле чертежа выполнится построение профиля зубьев, а в диалоговом окне появится соответствующая запись о данной операции (рис. 2.15).

Построение 3D-модели шкивов осуществляется на основе построенной плоской модели *КОМПАС-SHAFT 2D*. Готовая трехмерная модель помещается в новый документ КОМПАС-3D. Пример оформления чертежа приведен на рис. 2.16.

**Подобранные передачи**

Число зубьев ведущего шкива	26
Делительный диаметр ведущего шкива, мм	182
Число зубьев ведомого шкива	52
Делительный диаметр ведомого шкива, мм	364

Обозначение ремня	Число зубьев ремня	Межосевое расстояние, мм	Длина ремня, мм	Ширина ремня, мм
OCT 38 05114-76	71	339,669	1561,372	25
OCT 38 05114-76	75	385,089	1649,336	25
OCT 38 05114-76	80	441,439	1759,292	25
OCT 38 05114-76	85	497,473	1869,248	25
OCT 38 05114-76	90	553,291	1979,203	25
OCT 38 05114-76	95	608,963	2089,159	25
OCT 38 05114-76	100	664,499	2199,115	25
OCT 38 05114-76	105	719,957	2309,071	25
OCT 38 05114-76	112	797,485	2463,009	25

Рис. 2.13. Окно выбора варианта передачи

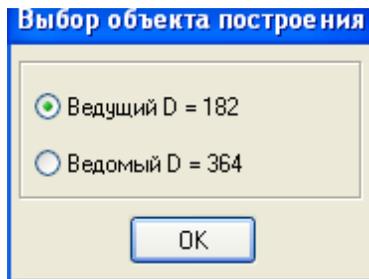


Рис. 2.14. Окно выбора объекта

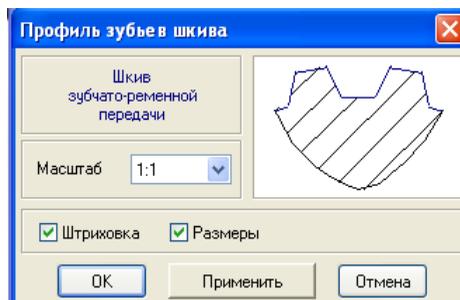


Рис. 2.15. Диалоговое окно профиля зубьев



появилась возможность вводить нестандартные значения модулей. Для зубчатых колес с нестандартным или зарубежным модулем и исходным контуром стал возможен выбор нестандартного долбяка. Список таких долбяков формируется самостоятельно. При добавлении нового долбяка автоматически выполняется его упрощенный геометрический расчет. В процессе работы список долбяков можно пополнять и корректировать.

2. Проектирование шлицев. Функционал проектирования шлицев дополнен режимом построения нестандартных шлицев по прототипу или без него. В качестве прототипа могут быть выбраны шлицы, параметры которых соответствуют отечественным стандартам или стандартам зарубежных стран (DIN 5482-1973, SAE J499A-1975, DIN 5471-1974, DIN 5472-1980). При необходимости практически любой параметр нестандартных шлицев может быть изменен.

3. В расчет червячной передачи добавлены червяки типов ZT1, ZT2, ZN3, ZK4.

4. Расчет и построение винтовой эвольвентной зубчатой передачи с последующей визуализацией работы зубчатого зацепления и использованием «стоп-кадра».

5. Шпоночные пазы расширенного типажа и размеров.

6. Подшипники и манжеты строятся с помощью справочника или библиотеки стандартных изделий.

7. Все базы данных переведены на более современную и удобную СУБД Absolute DataBase. В новой версии библиотеки появилась возможность устанавливать параметрические зависимости между различными ступенями проектируемой модели.

В приложении Валы и механические передачи 3D нашла отражение новая методика оптимизации зубчатого зацепления цилиндрической передачи внешнего зацепления. Автоматизированный расчет коэффициентов смещения позволяет спроектировать передачу с оптимальными свойствами по следующим критериям:

- контактная прочность;
- прочность по изгибу;
- равнопрочность зубьев;
- износостойкость и сопротивление заеданию;
- износостойкость и сопротивление заеданию;
- плавность работы.

Такой режим проектирования распространяется на реечную цилиндрическую зубчатую передачу, ортогональная передача (цилиндрический эвольвентный червяк/цилиндрическое косозубое колесо). В подобного рода передачах вместо червячного колеса применяют обычное косозубое цилиндрическое колесо, что значительно упрощает технологию изготовления. В круг рассматриваемых передач включена планетарная

зубчатая передача Джеймса, нашедшая применение в суммирующих звеньях кинематических схем металлорежущих станков.

В приложении Валы и механические передачи 3D разработаны модели зубчатых колес, используемых в многооперационных станках фрезерно-сверлильно-расточной групп. В специализированном вертикальном фрезерно-сверлильном станке второго типоразмера модели СФ16МФ3, который предназначен для многооперационной обработки изделий сложного профиля из сталей, чугуна, легких и цветных металлов, используется ступенчатая коробка скоростей (рис. 2.17).

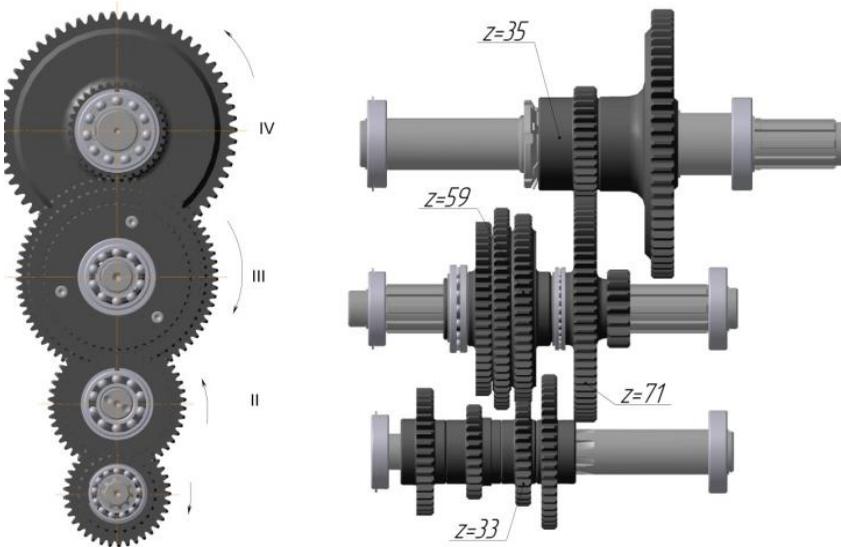


Рис. 2.17. Зубчатые передачи коробки скоростей

В станке СФ16МФ3 используются блоки зубчатых колес, 3D-модели которых представлены на рис. 2.18 [20, 21].

Цилиндрические зубчатые колеса широко используются в конструкции специального консольно-фрезерного станка с ЧПУ на базе модели СВМ1Ф4. В приложении «Валы и механические передачи» разработаны ряд моделей зубчатых колес и вал-шестерен (рис. 2.19)

В широкоуниверсальном станке с ЧПУ модели СФ68ВФ4 используются конические зубчатые колеса различной конструкции с прямым и круговым зубом (рис. 2.20).

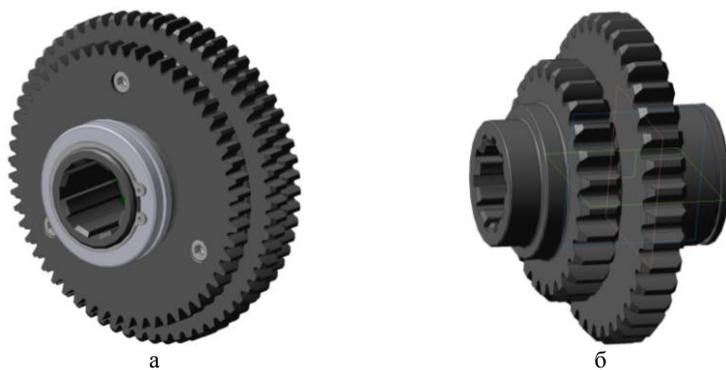


Рис. 2.18. Блоки зубчатых колес:  
 а – на первой ступени коробки скоростей; б – на второй ступени

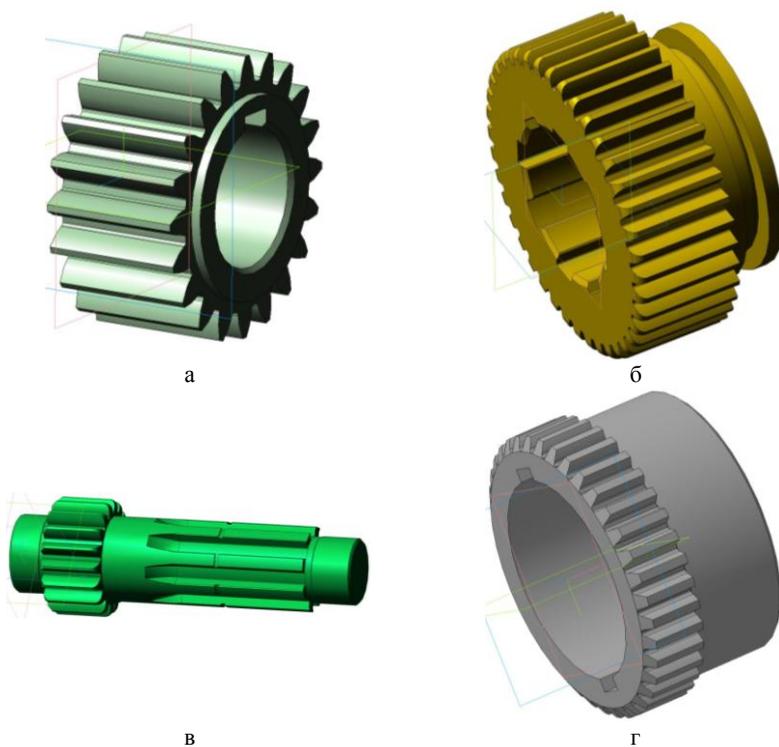


Рис. 2.19. Цилиндрические зубчатые колеса:  
 а – с осевой фиксацией; б – подвижные; в – вал-шестерня; г – втулка-шестерня

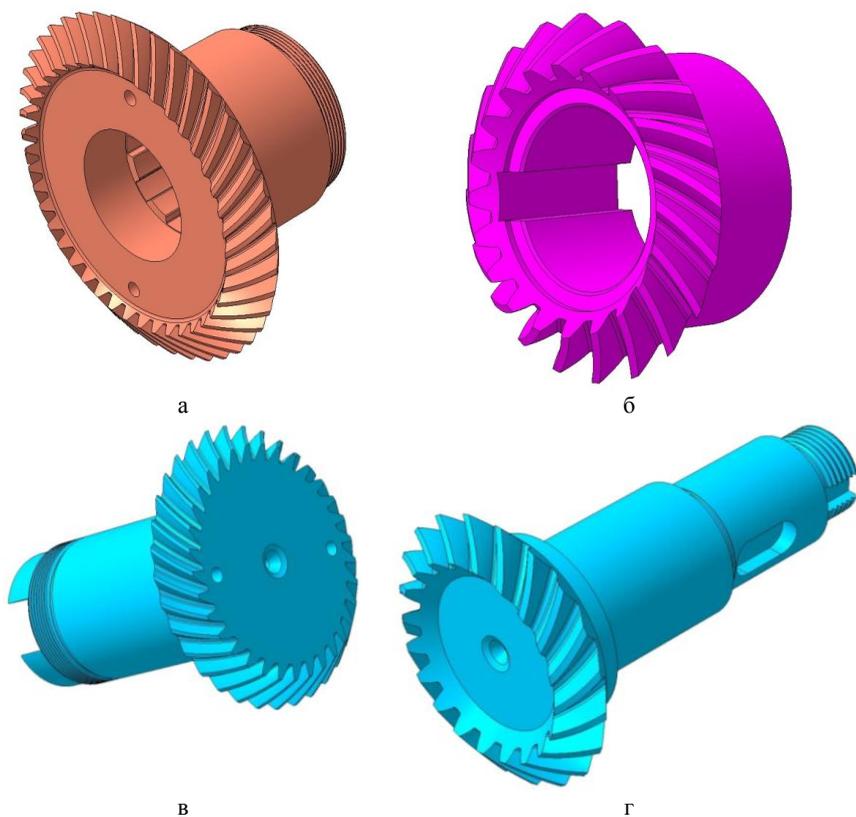


Рис. 2.20. Конические зубчатые колеса:  
а – со шлицами; б – со шпонкой; в – втулка-шестерня; г – вал-шестерня

Современные САПР способны моделировать элементы некоторых видов передач с достаточно высокой точностью визуализации рабочих поверхностей (цилиндрические зубчатые колеса, червяки, шкивы и т. д.). При моделировании конических зубчатых колес с круговым зубом визуализация далеко не полная – зубья (а точнее – впадины между ними) система не генерирует, поэтому такие модели являются весьма условными. Для получения полноценной 3D – модели конического зубчатого колеса с круговым зубом нужно применить иные методы моделирования, один из которых представлен ниже на примере САПР КОМПАС 3D.

Профилирование зуба осуществляется путем вырезания впадины, как это происходит при нарезании зубьев на зуборезном станке за счет удаления

материала. Практически вырезание осуществляется по построенным и расположенным в соответствующих положениях торцовым сечениям при помощи команды «Вырезать элемент по сечениям». При этом нужно учитывать следующие особенности круговых зубьев:

1. Вдоль впадины зуба не сохраняется геометрическое подобие профилей (сечение постоянно изменяется по форме и размерам).
2. Траектория расположения сечений является винтовой поверхностью, поэтому сечения занимают сложные пространственные положения.

Решение данной задачи можно условно разделить на следующие этапы:

1. Определение пространственного положения торцовых сечений (плоскостей, на которых они строятся);
2. Расчет дополнительных геометрических параметров зубчатого колеса, на основании которых строятся торцовые сечения;
3. Построение сечений;
4. Собственно вырезание.

Для геометрических построений, а также расчета параметров эквивалентного цилиндрического колеса, должны быть известны следующие данные, определяемые при стандартном геометрическом расчете конического колеса:

$z$  – число зубьев конического колеса;

$\delta$  – угол делительного конуса конического колеса;

$m_n$  – модуль нормальный;

$\beta_n$  – делительный угол наклона средней линии зуба конического колеса;

$R$  – конусное расстояние среднее;

$h_a$ ;  $h_f$  – высота делительной головки и ножки зуба соответственно;

$\theta_a$ ;  $\theta_f$  – угол делительной головки и ножки зуба конического колеса соответственно;

$d_0$  – диаметр зуборезной головки;

$\alpha_n$  – нормальный угол профиля на делительной окружности конического колеса с круговыми зубьями.

Положение каждого сечения определяется конусным расстоянием  $R_x$ , имеющим свое значение, принятое для каждого сечения. Чтобы получить поверхность впадины без резких переходов между сечениями, вполне достаточно пяти сечений. При этом крайние сечения нужно располагать на некотором удалении от торцов венца конического зубчатого колеса (2 – 5 мм), а среднее сечение для удобства вычислений расположить на длине среднего конусного расстояния  $R$ , тогда параметры в этом сечении равны средним расчетным для конического колеса.

Положение плоскостей, на которых расположены эскизы сечений, определяется точками пересечения цилиндрической поверхности (образуется при помощи команды «Поверхность выдавливания»), имитирующей инструмент и имеющей соответствующий диаметр ( $d_0$ ) и положение в пространстве (с учетом  $\beta_n$  и направления спирали), и поверхностью делительного конуса конического колеса. Эскиз цилиндрической поверхности (окружность) строится на плоскости, касательной к делительному конусу конического колеса. Окружность располагается таким образом, чтобы в точке, находящейся на среднем конусном расстоянии  $R$  (обычно это середина зубчатого венца) между касательной к окружности в этой точке и образующей конуса, проходящей через эту точку, образовывался угол  $\beta_n$  (рис. 2.21).

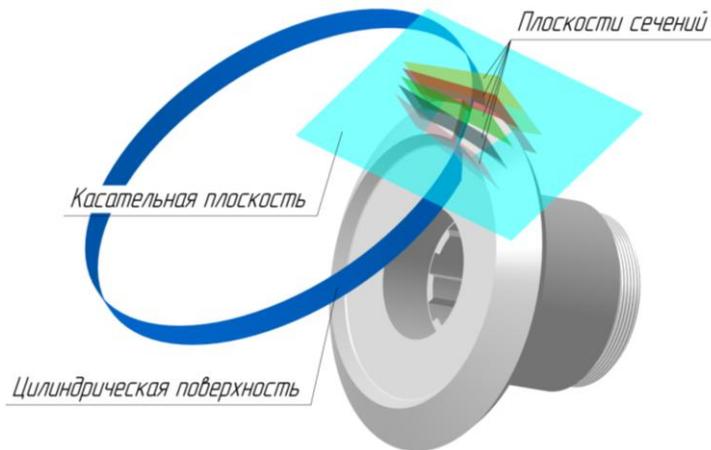


Рис. 2.21. Положение плоскостей эскизов сечений

Также для каждого сечения на расстояниях  $R_x$  выстраиваются конические поверхности, являющиеся дополнительными конусами, образующая которых перпендикулярна образующей делительного конуса. Плоскости, на которых будут построены эскизы сечений, являются касательными к дополнительным конусам и проходят через точки пересечения цилиндрической поверхности, делительного конуса и дополнительных конусов. В дальнейшем эти же точки являются базовыми при построении эскизов сечений.

Для построения торцового сечения нужно условно заменить коническое зубчатое колесо на эквивалентное цилиндрическое. Параметры

исходного контура эквивалентного цилиндрического колеса являются соответствующими торцовым параметрам конического зубчатого колеса. Параметры эквивалентного цилиндрического колеса, которые требуются для построения сечений впадины, определяются по известным аналитическим зависимостям [45]. Данные параметры эквивалентного цилиндрического колеса вычисляются для каждого сечения. На основании полученных данных выстраиваются эвольвенты, образующие боковую поверхность зуба в сечении (рис. 2.22). Толщина зуба (для упрощения расчетов) не рассчитывается, а принимается при графическом построении, исходя из углового шага эквивалентного цилиндрического колеса. Как показала практика, при этом нужно дополнительно расширить впадину на величину, приблизительно равную верхнему допуску на толщину зуба для данного конического колеса.

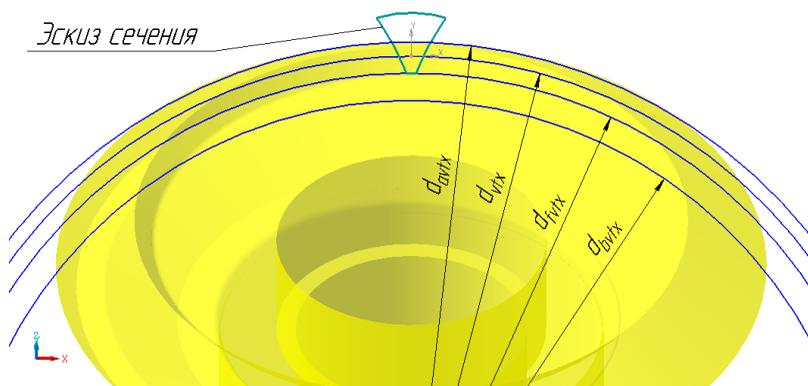


Рис. 2.22. Построение эвольвент боковой поверхности зуба

После построения всех сечений применяется команда «Вырезать элемент по сечениям». В результате на колесе образуется впадина (рис. 2.23). Затем, при помощи команды «Массив по концентрической сетке», количество впадин доводится до числа  $z$ .

Данный метод позволяет получать 3D – модели конических зубчатых колес с круговым зубом с достаточно высокой степенью схожести с реальными колесами. Описанный способ профилирования впадины имеет некоторые упрощения и погрешности геометрии, но ими можно пренебречь, так как они достаточно малы и практически не влияют на визуальное восприятие 3D – модели (рис. 2.24).

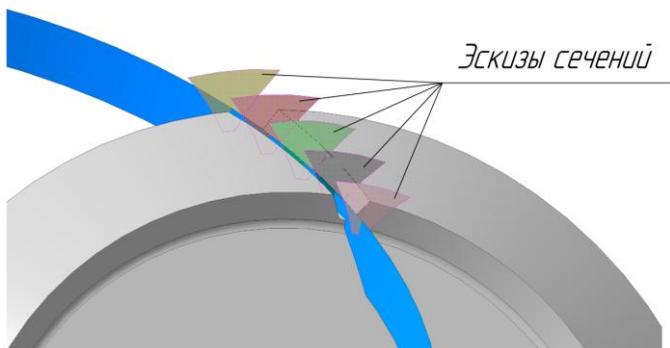


Рис. 2.23. Эскизы сечений

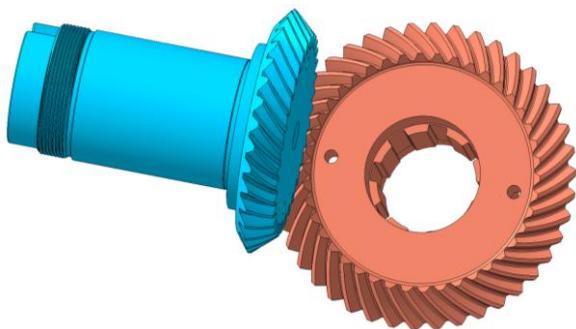


Рис. 2.24. Зацепление конических зубчатых колес с круговым зубом

### 2.3. Червячные передачи

В конструкциях коробок подач и поворотных столов нашли применения червячные передачи, 3D-модели которых приведены на рис. 2.25. Они выполняются безззорными, проблемой которых являются сложность изготовления витков с переменными осевыми углами и толщинами на правой и левой сторонах; необходимость изготовления специальной фрезы, делительный диаметр которой больше делительного диаметра червяка; неортогональная установка специальной фрезы при нарезке зубьев червячного колеса.

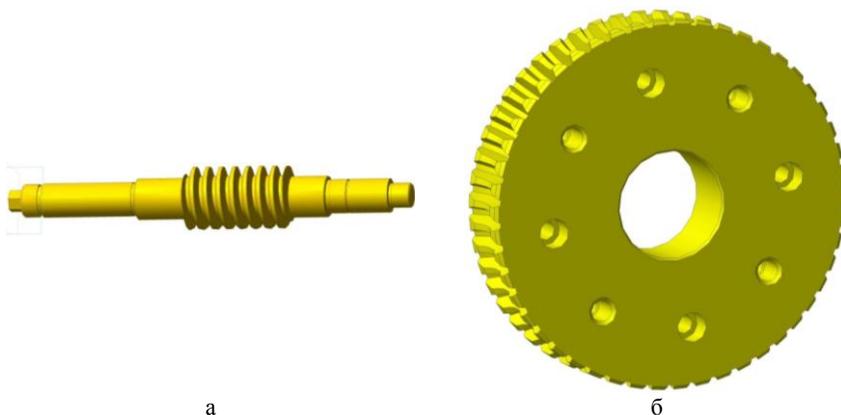


Рис. 2.25. Червячная передача:  
а – червяк; б – колесо червячное

В предлагаемом патенте [14] и работе [12] поставлена задача обеспечения безззорного зацепления в червячной передаче с использованием стандартных червяков, фрез и существующих технологий изготовления. Поставленная задача достигается за счет того, что червяк 1 под собственным весом  $G$  смещается вертикально вниз, сохраняя горизонтальную ось вращения, до соприкосновения его вершин с впадинами зубьев червячного колеса 2, расположенного в горизонтальной плоскости (рис. 2.26). В результате зазоры в зацеплении обнуляются.

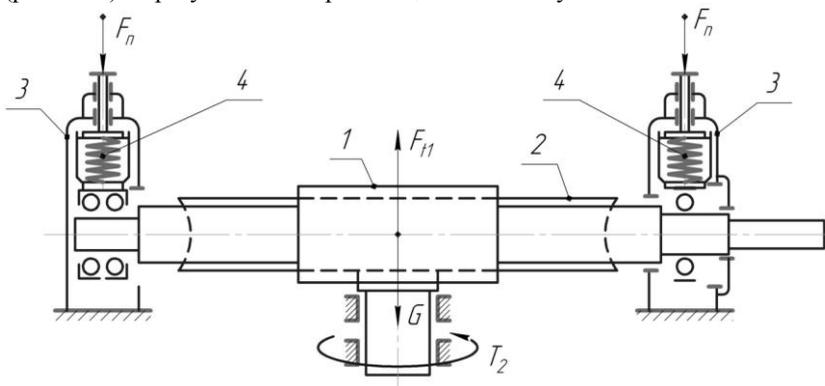


Рис. 2.26. Схема безззорной червячной передачи

Для осуществления вертикального смещения вала червяка его подшипники находятся в скользящих опорах 4, которые позволяют валу червяка самоустанавливаться в вертикальном направлении, сохраняя горизонтальную ось вращения. Опоры 4 имеют возможность перемещаться в корпусе 3 по вертикальному направлению благодаря выступам А треугольного профиля на опорах 1 и канавкам Б такого же профиля в корпусе 2, закрепленных неподвижно на корпусе механизма (рис. 2.27).

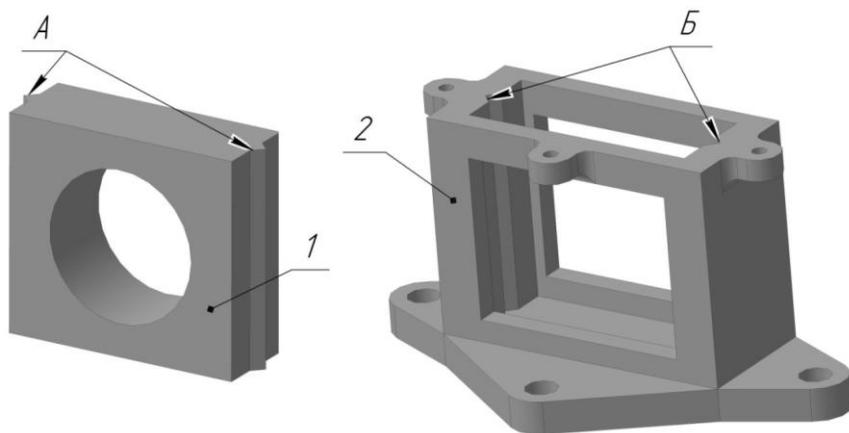


Рис. 2.27. Скользящая опора

Окружная сила червяка  $F_{t1}$ , направленная вниз, способствует сохранению беззазорного зацепления червяка с червячным колесом. При реверсе, когда сила  $F_{t1}$  направлена вверх, рис. 2.26, подъему червяка вверх и, соответственно, образованию зазоров в зацеплении препятствует сила сжатия  $F_{II}$  пружин 4, установленных в корпусе 3 на скользящих опорах в которых закреплены подшипники вала червяка.

3D-модель беззазорной червячной передачи со скользящими опорами представлена на рис. 2.28 [12].

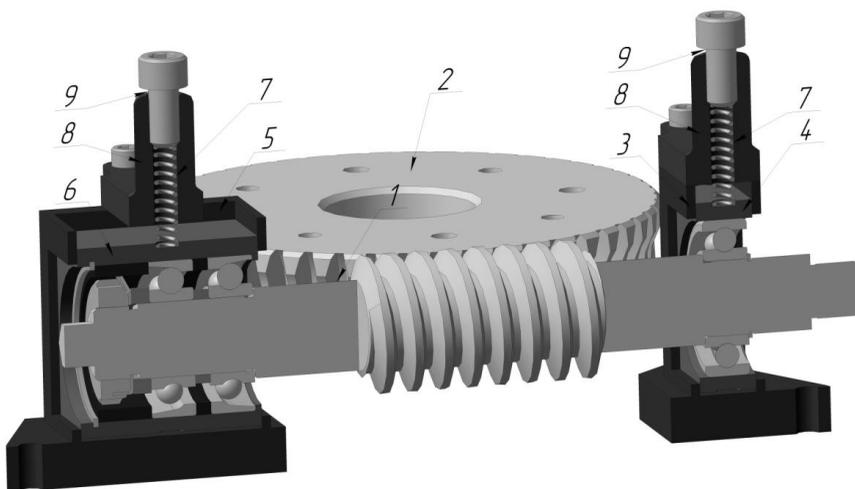


Рис. 2. 28. Беззазорная червячная передача в скользящих опорах

---

---

### **3. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

#### **3.1. Инструментальный магазин с автооператором**

Под инструментальной системой понимается комплекс устройств и средств, обеспечивающих процесс обработки поверхностей резанием [46, 47]. Управление процессом инструментального обеспечения осуществляется средствами автоматической смены инструмента (АСИ)

Смена инструмента вручную на многоцелевых станках обуславливает значительные простои этих дорогостоящих станков. Автоматическая смена инструмента осуществляется за 5 – 10 с против 25 – 40 с при смене вручную. Поскольку частота смен инструмента составляет примерно 20 – 25 раз в час, применение устройства АСИ на таких станках значительно повышает производительность обработки за счет повышения степени автоматизации станков, а также исключает возможные ошибки при смене инструмента.

В общем случае устройства АСИ многоцелевых станков состоят из следующих компонентов: инструментальных магазинов, являющихся накопителями инструмента (блоков режущего и вспомогательного инструмента для инструментальных шпинделей); инструментальных манипуляторов, предназначенных для смены инструмента в шпинделе станка; промежуточных транспортных манипуляторов, предназначенных для передачи инструмента от магазина к инструментальным манипуляторам или к промежуточным позициям – накопителям инструмента в позиции его смены.

Основные требования, предъявляемые к инструментальным магазинам, следующие; достаточная вместимость; высокая точность позиционирования инструмента в рабочем органе станка; легкость и удобство загрузки магазинов и хороший доступ к ним; минимальное время, затрачиваемое на смену инструмента; высокая надежность; наименьшее число координат при смене инструмента.

Устройства для смены инструмента в шпинделе станка с манипулятором могут быть полуавтоматическими и автоматическими. Полуавтоматические устройства состоят из магазинов-накопителей инструмента и манипулятора для автоматической установки инструмента в шпиндель станка и обратно. В автоматических устройствах манипулятор автоматически забирает инструмент из магазина-накопителя или транспортного манипулятора и помещает инструмент в шпиндель станка.

Магазины устройств АСИ с манипулятором подразделяются на дисковые, барабанные и цепные. Дисковые магазины применяются с горизонтальной, вертикальной и наклонной осями вращения. В магазинах с вертикальной осью вращения инструменты могут быть установлены вертикально, горизонтально или под углом (корончатые).

К инструментальным магазинам многооперационных станков предъявляются следующие требования:

1) вместимость магазина должна быть такой, чтобы комплекта загруженных в него инструментов хватало для обработки типовой детали;

2) он должен иметь простую конструкцию, быть достаточно компактным;

3) магазин должен располагаться вне рабочей зоны станка, не мешать рабочим движениям станка, установке и снятию заготовок, наладке станка;

4) должен быть обеспечен легкий, удобный и безопасный доступ наладчика и оператора к инструментальному магазину;

5) все подготовительные действия для смены инструментов должны выполняться на станке параллельно с обработкой детали, что сокращает затраты времени на смену инструмента;

б) операции смены инструментов не должны вызывать вибраций самого станка.

Выбор типа магазина определяется назначением, типом и компоновкой, многооперационного станка. Анализ всего многообразия корпусных деталей средних размеров, которые целесообразно обрабатывать на многооперационных станках, показывает, что около 18 % деталей требуют использования не более 10 инструментов, 50 % — до 20; 17 % - до 30, 10 % - 40 и 5 % - до 50 и более инструментов. Поэтому чаще применяют магазины вместимостью до 30 инструментов, в основном дисковые (или барабанные)

В специализированный многооперационный станок с ЧПУ на базе модели СВМ1Ф4 используется устройство АСИ с дисковым магазином, установленным на стойке станка, и двухзахватным манипулятором (рис. 3.1). Смена инструмента осуществляется в фиксированном положении шпиндельной бабки.

Студентом кафедры МВИ СНУ им. В.Даля Литвиненко С.С. разработана конструкция устройства АСИ, включающая 1330 3D-моделей

моделей деталей и сборок. Проект представлен в галерее XIII Международного конкурса «Будущие Асы Компьютерного 3D-моделирования», организованного группой компаний АСКОН в 2015 году.

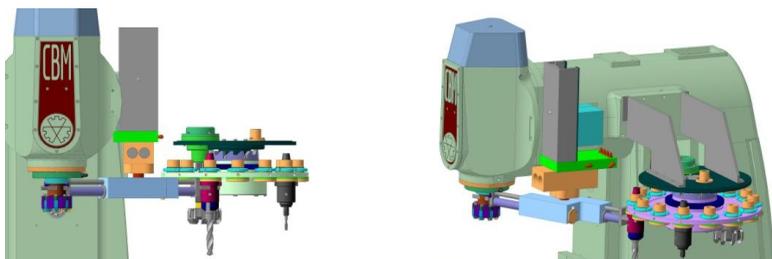


Рис. 3.1. Конструкция устройства автоматической смены инструмента

Инструментальный магазин предназначен для хранения и выдачи на позицию инструмента, инструментальных оправок с режущим инструментом. Независимо от типа магазина и способа смены инструмента все режущие и другие вспомогательные инструменты и устройства устанавливаются в посадочное отверстие шпинделя станка или в гнездо магазина с помощью стандартизированных оправок, в которых инструменты закрепляются, а если требуется, то и настраиваются на заданный размер обработки либо вне станка, либо автоматически от системы ЧПУ станка.

На рис. 3.2 представлена конструкция дискового инструментального магазина на 14 инструментальных гнезд, а на рис. 3.3 его сечение, дающее представление о конструкции деталей и сборки магазина.

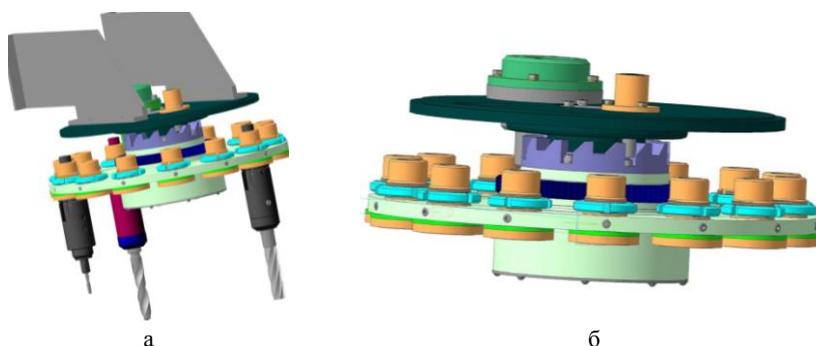


Рис. 3.2. Дисковый инструментальный магазин:  
а – с инструментом и креплением; б – сборка

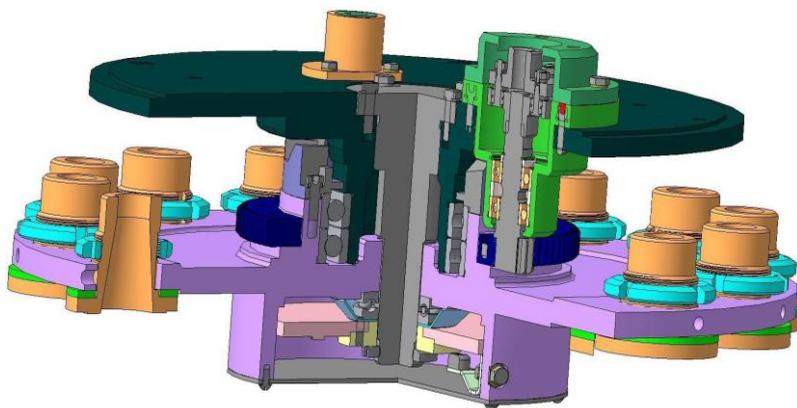


Рис. 3.3. Сечение инструментального магазина

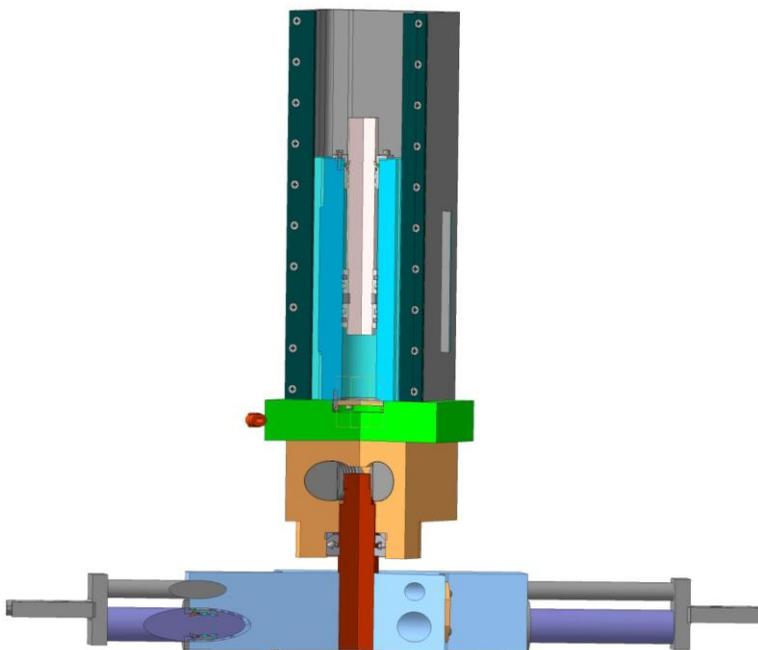


Рис. 3.4. Манипулятор – автооператор

Смену инструмента в данном дисковом инструментальном магазине осуществляет двухзахватный поворотный манипулятор (рис. 3.4). В позиции смены инструмента манипулятор поворачивается на  $90^\circ$ , захватывая инструмент в магазине и инструмент в шпинделе станка, затем перемещается вперед, вынимая инструменты из гнезд магазина и шпинделя. Манипулятор поворачивается на  $180^\circ$ , меняя инструменты местами, затем перемещается назад, устанавливая инструменты в гнезда магазина и шпинделя. После этого манипулятор поворачивается на  $90^\circ$  в исходное положение. Такая конструкция манипулятора обеспечивает простой цикл работы. Недостаток конструкции – небольшое число инструмента, установленного в магазине, поскольку при небольшом расстоянии между инструментами при повороте манипулятор будет задевать за соседний инструмент.

Отдельные сборки функциональных узлов автооператора представлены на рис. 3.5.

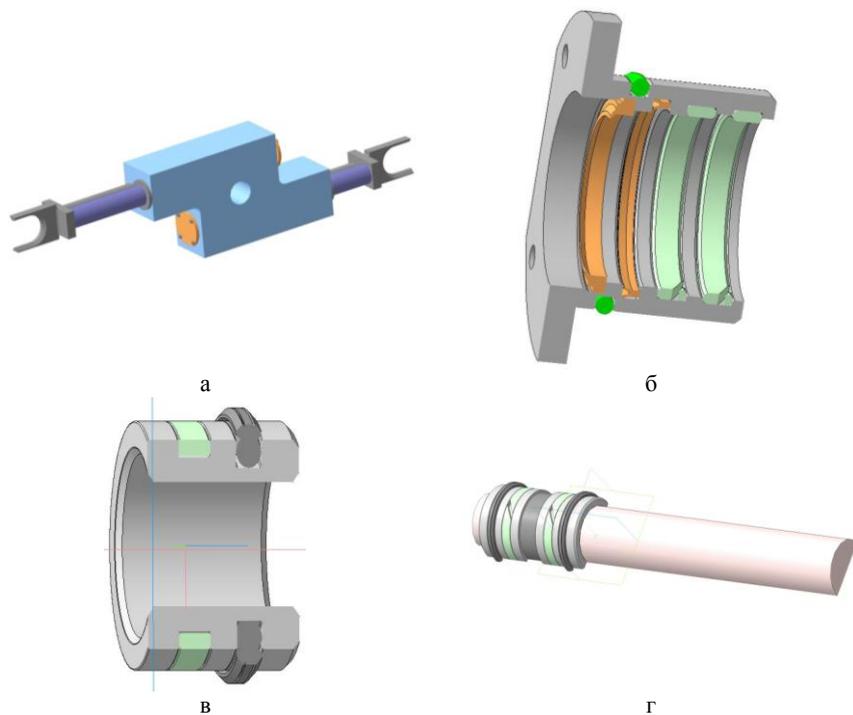


Рис. 3.5. Сборки узлов автооператора:  
а – захват; б – грандбукса; в – поршень; г – шток

## 3.2. Инструментальная оснастка

Инструментальная оснастка представляет собой определенный набор приспособлений, с помощью которых осуществляется крепление и монтаж обрабатываемых на станках заготовок, сборка разнообразных конструкций, а также транспортировка заготовок и готовых изделий.

В данной работе реализована процедура построения 3D-моделей инструментальной оснастки [21] в системе КОМПАС-3D: для фрезерования (рис. 3.6, а), развертывания (рис. 3.6, б), сверления (рис. 3.6, в), резьбонарезания (рис. 3.6, г) и других.



Рис. 3.6. – Инструментальная оснастка:  
а – фрезерная оправка; б – оправка с разверткой;  
в – сверлильная оправка; г – оправка для резьбонарезания

В системе КОМПАС-3D также построена твердотельная модель расточной оправки с микрорегулировкой реза для чистового растачивания (ТУ 2-035-774-80), представленная на рис. 3.7.

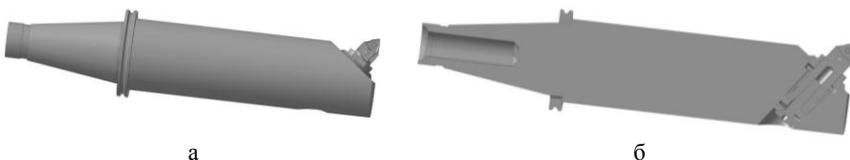


Рис. 3.7. Расточная оправка: а – сборка; б – сечение

Основной компонент расточной оправки является микробор - резец-вставка угловой расточной с микрометрическим регулированием с механическим креплением пластин по ОСТ 2И29-1-81. Твердотельная модель микробора представлена на рис. 3.8.

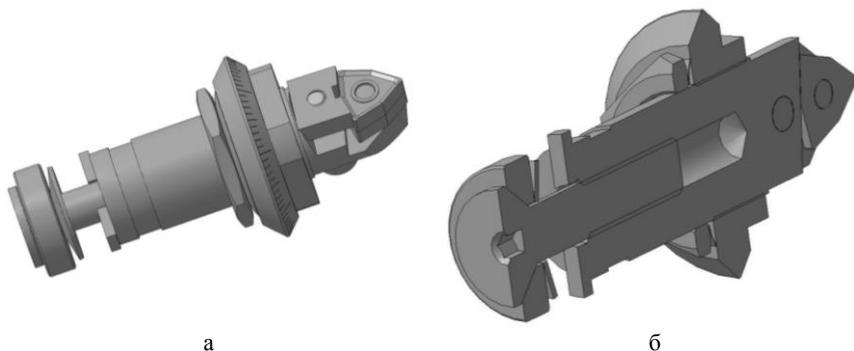


Рис. 3.8. Микробор: а – сборка; б – сечение

Рендеринг оправки и микробора представлен на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Рендеринг: а – расточная оправка; б – микробор

Разнос расточной оправки показан на рис. 3.10

При построении сборок инструментальных блоков (рис. 3.11) использованы 3D-модели оригинальных деталей. Для фрезерного инструментального блока они представлены на рис. 3.12.



Рис. 3.10. Разнос расточной оправки

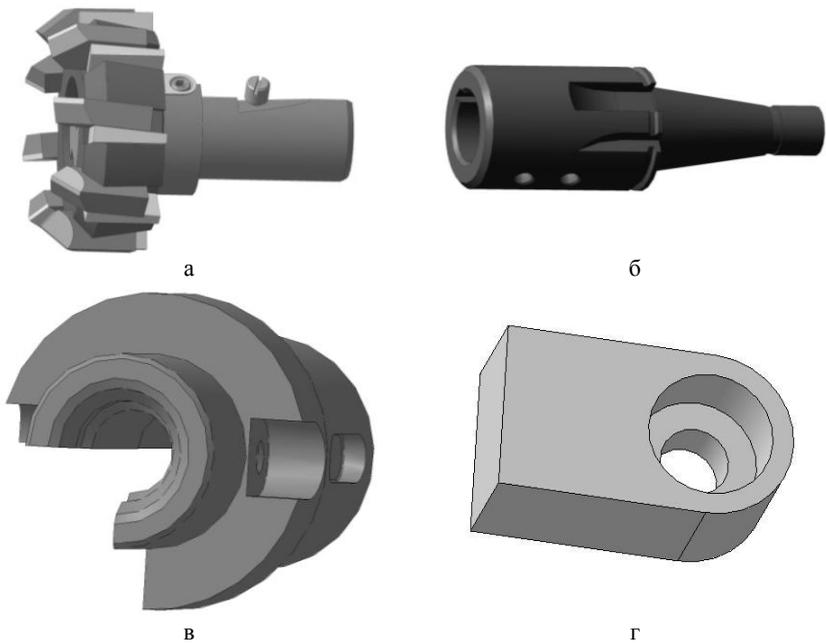


Рис. 3.11. 3D-модели комплектующих фрезерного инструментального блока:  
а – инструментальный блок для торцевого фрезерования; б – держатель;  
в – втулка переходная; г – шпонка

Комплектующие сверлильного инструментального блока представлены на рис. 3.12.

Состав комплектующих инструментального блока для зубонарезания представлен на рис. 3.13.

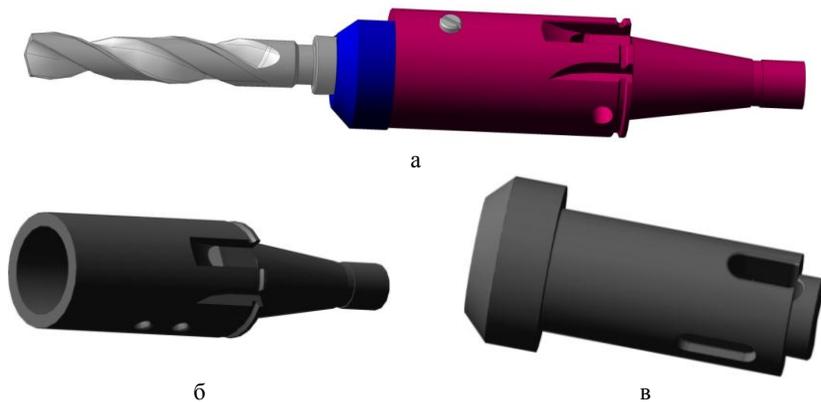


Рис. 3.12. 3D-модели комплектующих сверлильного инструментального блока: а – инструментальный блок для сверления; б – держатель; в – втулка переходная

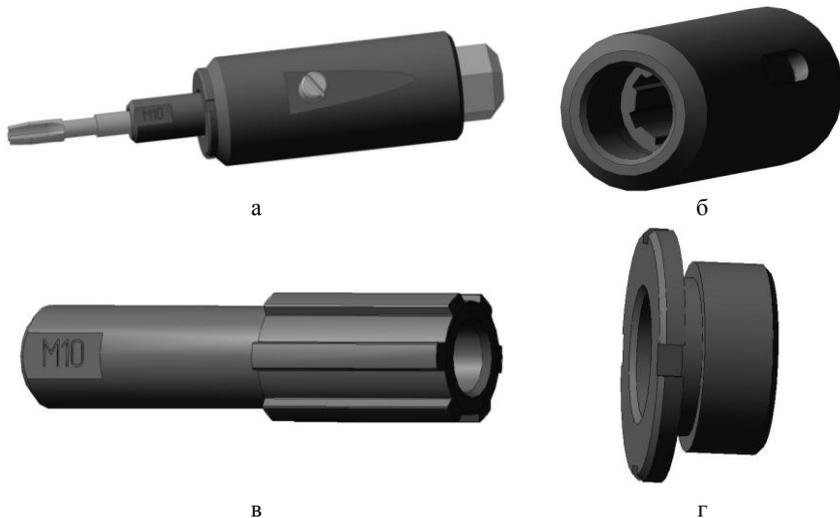


Рис. 3.13. 3D-модели комплектующих инструментального блока для нарезания резьбы: а – инструментальный блок для резбонарезания; б – втулка; в – переходник; г – гайка

Средствами САПР КОМПАС-3D создается фотореалистическое изображение инструментального блока на примере операции сверления (рис. 3.14) и фрезерования (рис. 3.15). В модуле Artisan Rendering имеются возможности комбинации материалов и освещения, фактуры и рельефности. При этом фактуры содержат отражения и прозрачности таких элементов как зеркало или стекло.

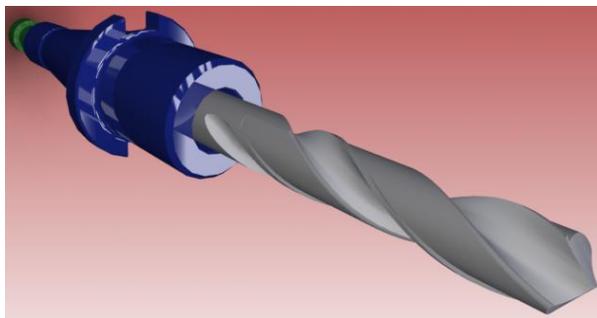


Рис. 3.14. Рендеринг инструментального блока для сверления

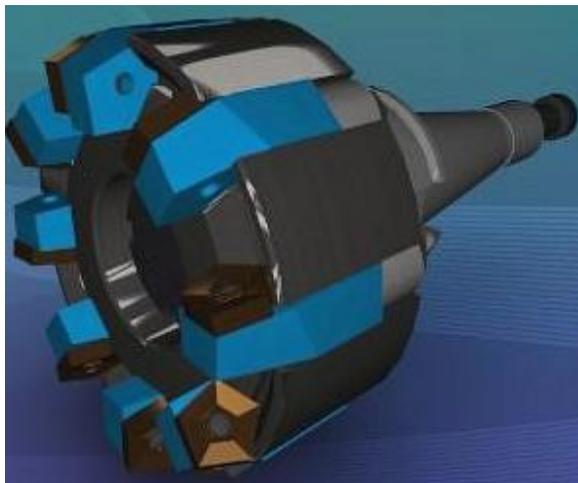


Рис. 3.15. Рендеринг инструментального блока для фрезерования

В качестве сменной инструментальной оснастки используется также быстроходная инструментальная головка, которая предназначена для высокопроизводительной обработки цветных металлов и их сплавов концевыми фрезами, сверлами и другим инструментом с минимальным диаметром – 5 мм. Разработана 3D-модель [2] быстроходной головки (рис. 3.16), сечение которой представлено на рис. 3.17.

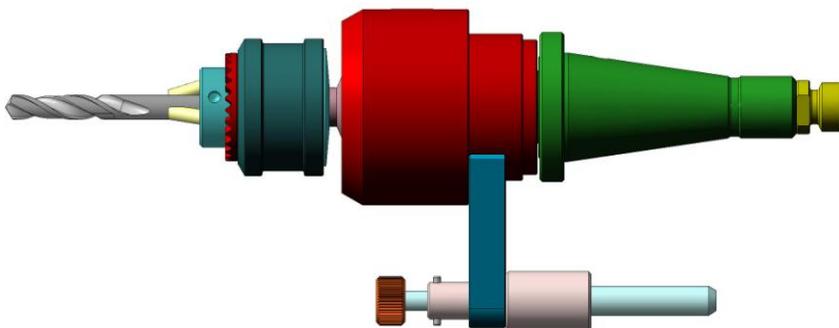


Рис. 3.16. Быстроходная сверлильная головка

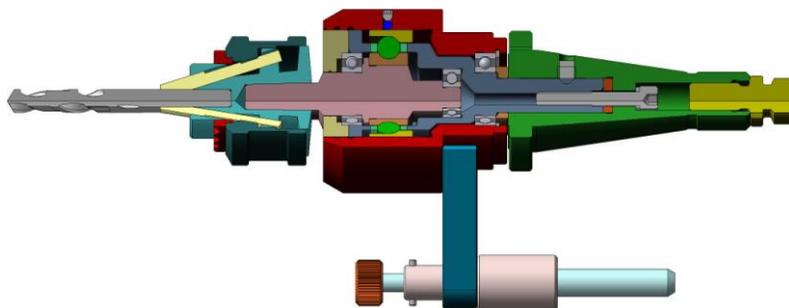


Рис. 3.17. Сечение быстроходной сверлильной головки

Зажим быстроходной головки в шпинделе станка производится также как и инструмента. Штырь фиксатора головки вводится в отверстие кронштейна, прикрепленного к торцу гильзы для исключения поворота быстроходной насадки в концевом отверстии шпинделя. При этом частота вращения поводка увеличивается от исходной на шпинделе в 2,5 раза.

В рассмотренной выше инструментальной оснастке многооперационных станков применяют оправки с коническим хвостовиком с конусностью 7:24, исключая самоторможение. Это дает возможность при большой жесткости соединения оправки со шпинделем с высокой точностью базировать оправку в шпинделе, а также легко извлекать ее с помощью автооператора. В шпинделе оправка обычно удерживается с помощью тяги и пакета тарельчатых пружин или закрепляется винтом. Тяга имеет на конце захватное устройство, которое обеспечивает сцепление с хвостовиком, ввернутым в оправку.

К вспомогательному инструменту для станков с ЧПУ фрезерно-сверлильно-расточной группы предъявляют следующие основные требования: высокая точность; минимальная погрешность установки; высокая жесткость во всех направлениях приложения составляющих сил резания; виброустойчивость; быстросменность; надежность; легкая и быстрая настройка инструмента на требуемый размер вне станка; универсальность; простота конструкции и технологичность; минимальная номенклатура вспомогательного инструмента.

### **3.3. Режущий инструмент**

В многооперационных станках фрезерно-сверлильно-расточного типа нашли применение режущие инструменты различных типов.

Сверло, как осевой инструмент в своей рабочей части включают режущую и калибрующую компоненты, на которых образованы две винтовые канавки, создающие два зуба, обеспечивающие процесс резания. Наибольшее распространение находят спиральные сверла с цилиндрическим и коническим хвостовиком. Для уменьшения трения в процессе работы сверла по всей длине направляющей части имеется занижение по спинке с образованием на режущей кромке ленточки шириной 0,2...2 мм. Винтовая часть задней поверхности является развертывающей винтовой поверхностью, что дает возможность получать более рациональное распределение значений задних углов. Это также способствует уменьшению осевых нагрузок за счет увеличения задних углов на поперечной режущей кромке.

В САПР КОМПАС-3D с учетом вышеперечисленных конструктивных особенностей разработана твердотельная модель спирального сверла с цилиндрическим и коническим хвостовиком (рис. 3.18)

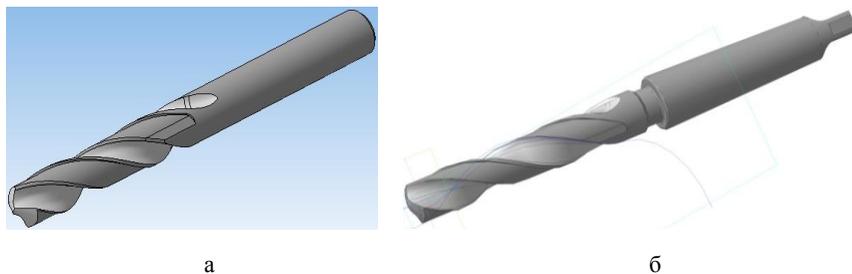


Рис. 3.18 Спиральные сверла:  
 а – с цилиндрическим хвостовиком; б – с коническим хвостовиком

При сверлении отверстий большого диаметра образование отверстий производится последовательно двумя сверлами разных диаметров, соотношение которых должно быть таким, чтобы диаметр первого сверла был больше длины поперечной кромки второго сверла. При этом условии поперечная кромка второго сверла не участвует в резании, вследствие чего значительно уменьшается усилие, необходимое для осуществления подачи, и, что очень важно, уменьшается увод сверла в сторону от оси обрабатываемого отверстия.

Конструкция сверла для рассверливания в 3D представлена на рис. 3.19,а.

Для обработки центровых отверстий по ГОСТ 14034-74 различной конфигурации и размеров применяют центровочные сверла комбинированные. Они имеют угловой профиль сечения канавок (угол  $90...110^\circ$ ) и на них отсутствует ленточка как на сверловочной так и на зенковочной части сверла. При этом спинка режущей части затылуется по архимедовой спирали (рис. 3.19, б)

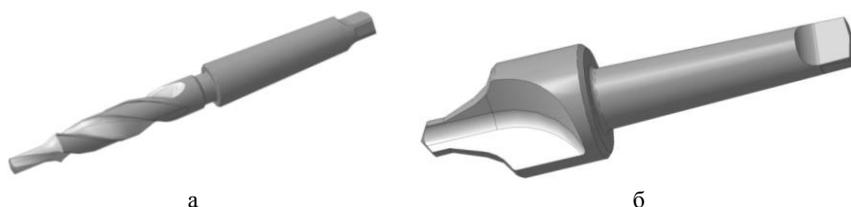


Рис. 3.19. Сверла: а – для рассверливания; б – для центровки

Для чистовой обработки отверстий 6...10 квалитетов точности применяются развертки с рабочей частью в виде стружечных канавок (прямых или винтовых), разделяющих зубья разверток. Форма зубьев в сечении перпендикулярном к оси развертки характеризуется прямолинейной передней поверхностью, а ленточка выполняется по цилиндру (рис. 3.20).

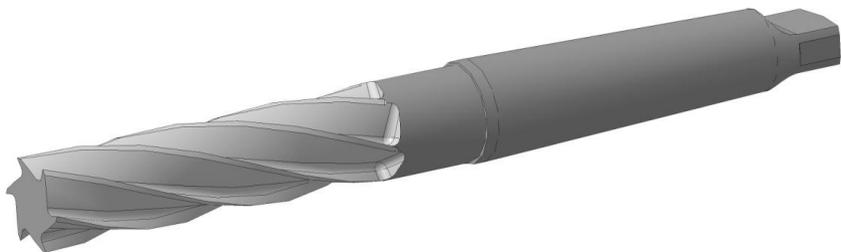


Рис. 3.20. Твердотельная модель развертки цилиндрической

Для обработки плоскостей часто используются фрезы торцевые, которые относятся к группе 1800 по ОКП, подгруппа 1890 – фрезы для станков с ЧПУ, вид 1895 – торцевые твердосплавные фрезы с механическим креплением многогранных и круглых пластин. Основной особенностью фрез, оснащенных неперетачиваемыми пластинами, является фиксированное расположение режущих элементов относительно корпуса фрезы. Геометрические параметры фрез при этом постоянны и определяются конструкцией фрезы. На рис. 3.21 показана 3D-модель насадной торцевой фрезы с неперетачиваемыми твердосплавными пластинами.

При обработке пазов и уступов, поверхностей в труднодоступных местах применяются концевые фрезы (подгруппа ОКП 1820; вид 1821), которые выполняются торцово-цилиндрическими с расположением режущих кромок, как на торце, так и на цилиндре. У концевых фрез общего назначения направления винтовых канавок и направление вращения не совпадают и форма торцовых зубьев отличаются переходным участком в виде фаски (рис. 3.22)



Рис. 3.21. Насадная торцовая фреза с неперетачиваемыми твердосплавными пластинами



Рис. 3.22. Концевая фреза

Многооперационный станок модели СФ68ВФ4 имеет модификацию с хоботом и пакетом дисковых фрез, расширяющих технологические возможности станка при зубонарезании.

*Дисковые зуборезные модульные фрезы* относятся к инструментам специального назначения. По конструкции и способам проектирования аналогичны фасонным фрезам с зубьями, затылованными в радиальном направлении, с прямыми или подфрезерованными по бокам стружечными канавками.

Так как дисковая зуборезная модульная фреза имеет нулевой передний угол и при нарезании цилиндрического прямозубого колеса работает методом копирования, то профилирование ее режущих кромок сводится к определению формы впадин зубьев обрабатываемого изделия.

Согласно ГОСТ 10996-64 профиль зуба фрезы состоит из эвольвентного, неэвольвентного участков и прямой. Для большой гаммы дисковых фрез, имеющих унифицированные функциональные элементы: эвольвентный профиль режущих лезвий; переходные поверхности, аппроксимируемые дугами; затылованная задняя поверхность, описываемая архимедовой спиралью целесообразно воспользоваться инструментарием параметризации [21, 22].

Алгоритм построения параметрической модели и синтаксис САПР АРМ WinMachine представлен в [37].

При профилировании инструментов, работающих по методу копирования, наряду с эвольвентной частью необходимо исследовать профиль нерабочей и неэвольвентной части фрезы, которые, в свою очередь, зависят от числа зубьев нарезаемого колеса  $z_1$ , а также и числа зубьев парного колеса  $z_2$ .

Известен способ нахождения точки  $K$  на эвольвентном участке профиля зуба, которая является границей активной части профиля зуба, фактически участвующей в зацеплении [48]. Положение точки  $K$  задается радиусом  $R_k$ . При дальнейшем вращении колеса выйдут из взаимного соприкосновения.

При больших числах зубьев радиус основной окружности колеса  $r_b$  будет меньше радиуса впадин  $R_f$  (рис. 3.23) и профиль зуба колеса АВ от окружности выступов до окружности впадин является эвольвентным. На рис. 3.23 показаны приемы построения эвольвентного и переходного профиля с использованием методики параметризации.

Параметризованный затылованный зуб фрезы представлен на рис. 3.24.

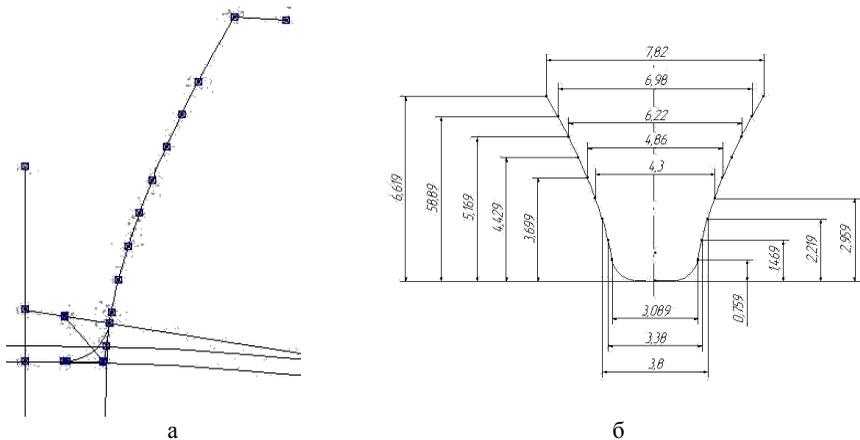


Рис. 3.23. Профиль канавки нарезаемого зубчатого колеса:  
 а – эвольвентный профиль с переходной кривой; б – контур канавки зуба

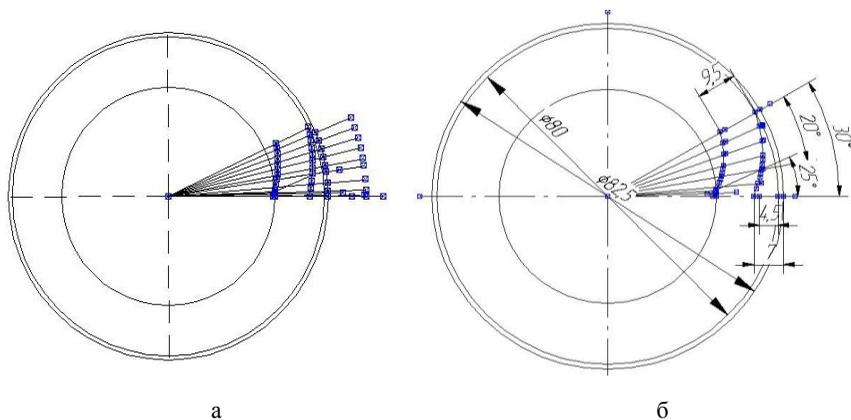
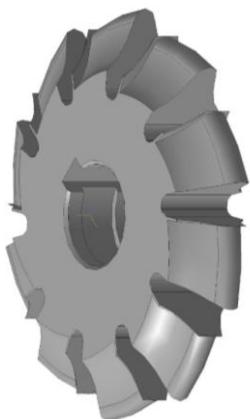
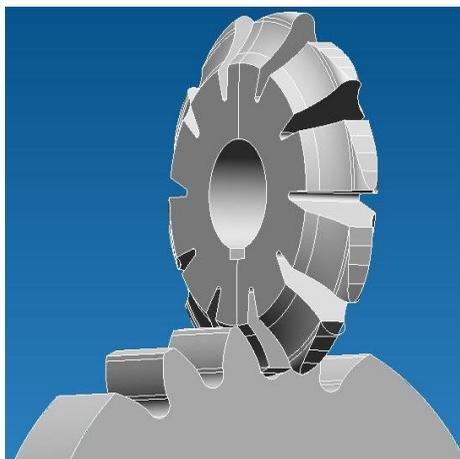


Рис. 3.24. Затылование задней поверхности зуба:  
 а – однократное затылование; б – двукратное затылование

На основе полученных профилей в режиме «Эскиз» построены твердотельные модели дисковых фрез в модуле APM Studio (рис. 3.25).



а



б

Рис. 3.25. Твёрдотельные модели дисковой фрезы:  
а – конструкция; б – схема нарезания

---

---

## 4. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

### 4.1. Базовые детали фрезерных станков

Пространственное расположение формообразующих узлов станка обеспечивается несущей системой станка, как совокупностью базовых узлов [49, 50, 51]. К ним относятся, в первую очередь, корпусные детали: станины, стойки, колонны, корпуса шпиндельных бабок и другие. Базовые детали должны характеризоваться высокой точностью и жесткостью, а также повышенными демпфирующими свойствами (способность гасить вибрацию в рабочей зоне станка).

Корпусные детали находятся под действием комбинированных нагрузок (изгиб с кручением) и изготавливаются пустотелыми с замкнутым профилем.

В конструкции фрезерных станков чаще всего используются вертикальные станины (стойки). Форма станин приближается к коробчатой с внутренними стенками и перегородками (ребрами), которые необходимы для повышения жесткости и образования отдельных полостей и отсеков. Ребра специальной конфигурации, например диагональные, обеспечивают еще большее увеличение жесткости. Стойки, испытывающие сложные пространственные нагрузки имеют профиль, приближающийся к квадратному.

С точки зрения влияния на деформацию при кручении целесообразно такое изменение сечений, при котором с удалением от основания стойки, форма сечений приближается к квадратной. Такой профиль характерен для базовой детали «колонна» станка широкоуниверсального многооперационного станка с ЧПУ модели СФ68ВФ4.

На чугунном основании станка закреплена колонна, на которой монтируются все основные части станка. По горизонтальным направляющим колонны перемещается бабка шпиндельная (ось "Z"), к которой крепится вертикальная головка или дополнительные устройства и приспособления.

По вертикальным направляющим колонны перемещается суппорт (ось "Y"), а по его горизонтальным направляющим основной

вертикальный стол (ось "X"), к которому крепится, в зависимости от комплектации, жесткий угловой стол или поворотный стол для установки на них обрабатываемых деталей

3D- модель колонны создана в САПР КОМПАС [1, 2] (рис. 4.1). На рис. 4.2 представлено поперечное сечение колонны станка.

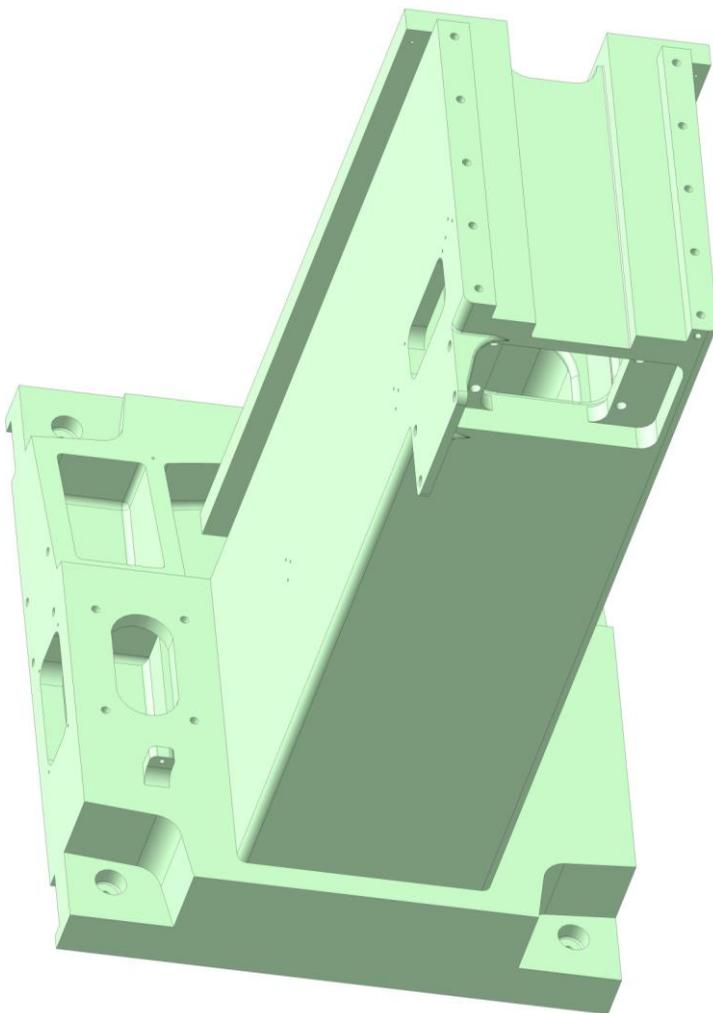


Рис. 4.1. Твёрдотельная модель колонны станка СФ68ВФ4

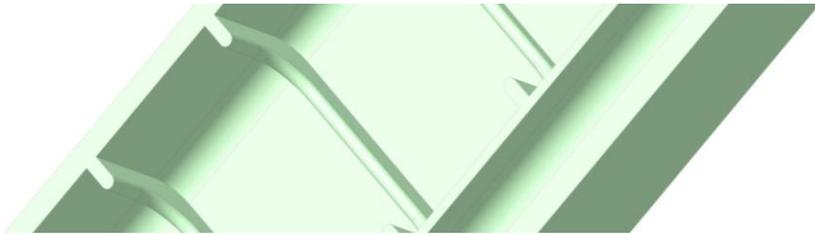


Рис. 4.2. Поперечное сечение колонны

В вертикально-фрезерных консольных станках с ЧПУ моделей СВМ1Ф4 и СФ16МФ3 в качестве основной базовой детали используется «станина с коробкой скоростей». На этой станине монтируются узлы и механизмы станка. На корпусе станины имеются вертикальные направляющие по которым перемещается консоль, а в верхней части корпуса смонтирована коробка скоростей. Повышенная жесткость базовой детали достигается наличием большого числа ребер жесткости диагонального типа. Во избежание коробления стенок расстояние между ребрами не должно быть больше 400 мм. У большинства станков момент сил, действующих на стойку у основания, больше чем сверху, поэтому стойки часто выполняются расширяющимся книзу, хотя бы в одной плоскости.

В системе КОМПАС разработаны 3D- модели базовой детали «станина с коробкой скоростей» [9, 10, 20] , которые представлены на рис. 4.3 и рис. 4.4. Сечения этих деталей представлено на рис. 4.5.

Моделирование этих базовых деталей достаточно сложный процесс – чертежи каждой представлены на 5 листах формата А1. Целесообразным является максимальная унификация, которая видна на рис. 4.3...4.5. Фрагмент чертежа корпуса станины с коробкой скоростей, выполненного на основе принципа ассоциативности, представлено на рис. 4.6. Для этого в системе КОМПАС имеется команда «Создать новый чертеж из модели», которая обеспечивает создание чертежа с ассоциативным видом текущей трехмерной модели.

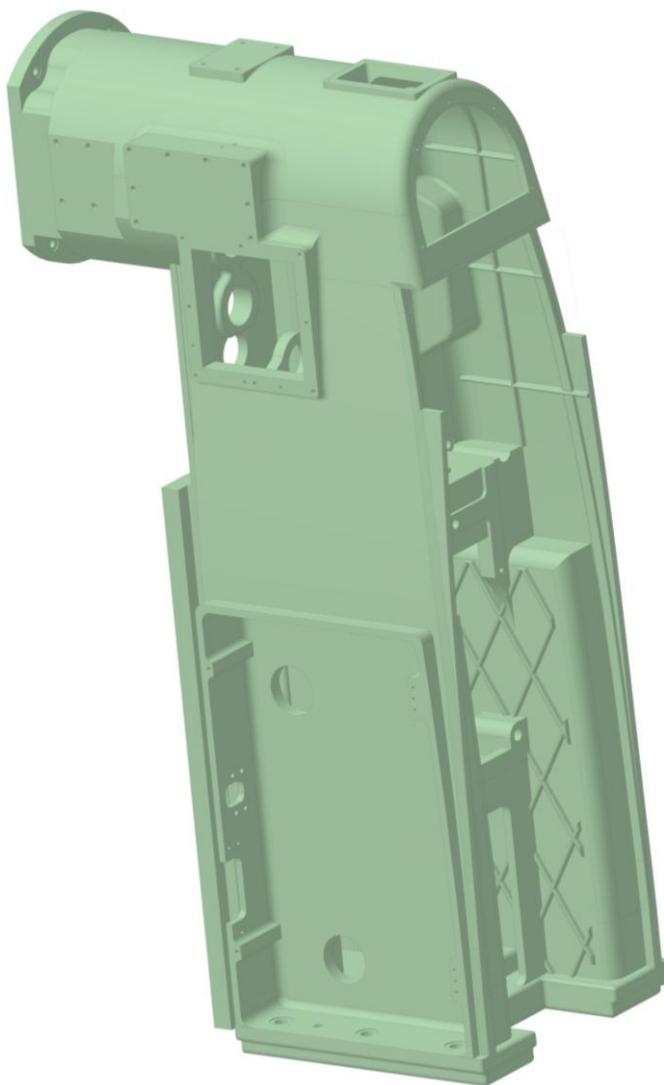


Рис. 4.3. 3D-модель корпуса станины с коробкой скоростей станка СВМ1Ф4



Рис. 4.4. 3D-модель корпуса станины с коробкой скоростей станка СВ16МФ3

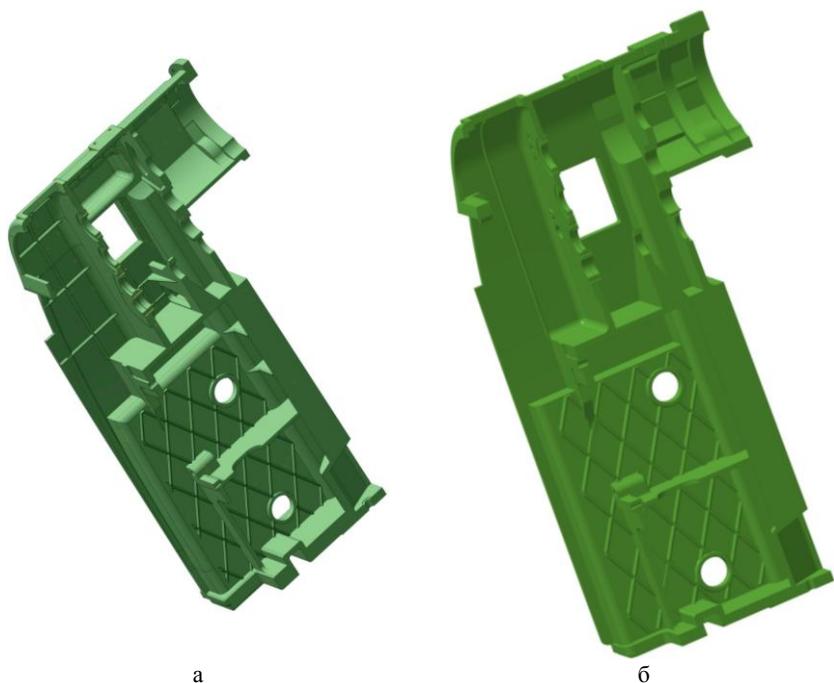


Рис. 4.5. Поперечные сечения корпусов:  
а – станка СВМ1Ф4; б – станка СФ16МФ3

## 4.2. Базовые детали коробок передач

К элементам несущих станков относятся различные конструкции коробок (коробки скоростей, шпиндельные бабки и т.п.). Большинство из этих конструкций имеют форму параллелепипеда. Наибольшее влияние на жесткость коробки оказывают увеличение жесткости стенки непосредственно в месте приложения нагрузки. Жесткость может быть существенно увеличена за счет бобышек и специальных ребер, подкрепляющих бобышки.

В системе КОМПАС разработана 3D- модель корпуса горизонтальной шпиндельной головки станка модели СФ68ВФ4 [1, 2, 5] , которая представлена на рис. 4.7. Сечение этой детали представлено на рис. 4.8.



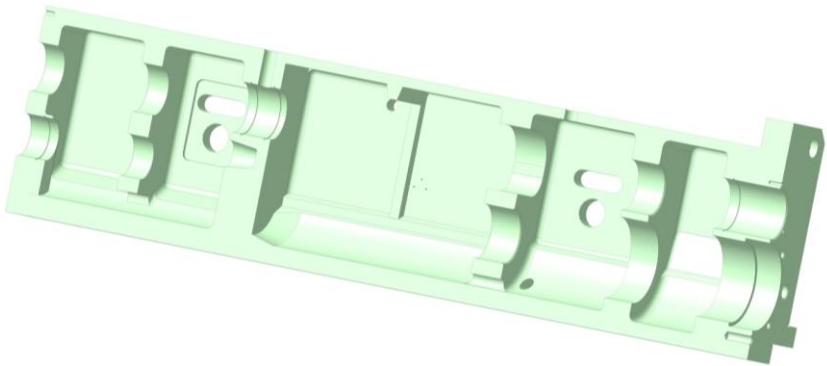


Рис. 4.8. Сечение коробки скоростей станка СФ68ВФ4

Шпиндельная бабка состоит из; корпуса чугунного литого, шпиндельного блока с механизмом автоматического зажима инструмента, распределительного вала, передающего вращение на горизонтальный или вертикальный шпиндель с помощью автоматического устройства переключения ведущей шестерни.

Конструкция бабки оснащена двухступенчатой коробкой скоростей управляемой гидрофицированным механизмом переключения скоростей; устройством подачи СОЖ в зону резания и электрических и оптоэлектрических датчиков контролирующих положение шпиндельной бабки и ее механизмов.

Широкоуниверсальный станок оснащен различной модульной оснасткой, включающей вертикальную и угловую шпиндельную головки.

Головка вертикальная крепится к шпиндельной бабке четырьмя винтами и центрируется при помощи двух конических штырей и втулок. Вертикальный шпиндель смонтирован в гильзе, имеющей перемещение в корпусе, получающей вращение через коническую пару и кулачковую муфту.

Благодаря наличию Т – образного паза в переходной плите головка поворачивается на  $90^\circ$  в обе стороны. Установка головки в нужное положение осуществляется штифтом. Для точной установки головки в вертикальном положении используется контрольная оправка, вставляемая и зажата в конусном отверстии шпинделя и стрелочный индикатор.

Разработана 3D-модель корпуса вертикальной шпиндельной головки [7], которая представлена на рис. 4.9.

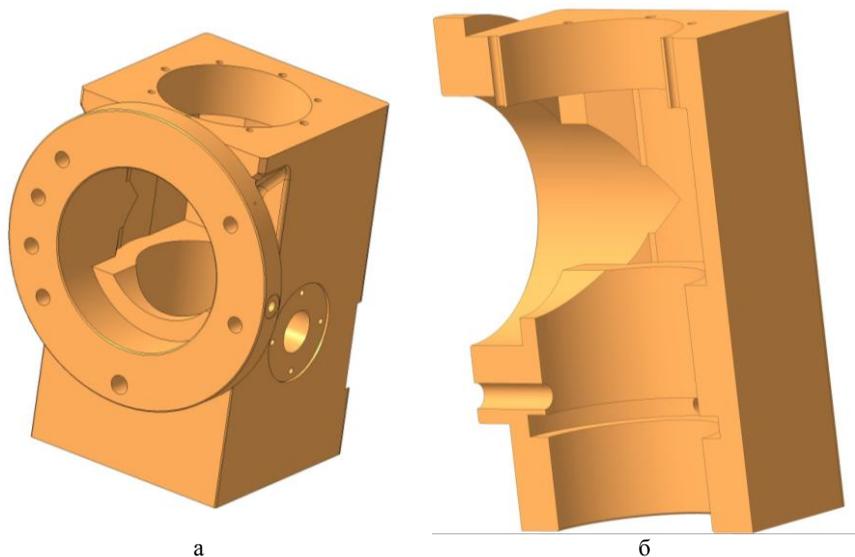


Рис. 4.9. Корпус вертикальной шпиндельной головки:  
а – конструкция; б – сечение

Угловая головка входит в комплект поставки проектируемого станка СФ68ВФ4 и позволяет расширить технологические возможности фрезерно-сверлильно-расточных станков. Угловая головка предназначена для обработки в труднодоступных участках заготовок плоскостей, уступов и пазов. Она обеспечивает высокопроизводительную обработку при частотах вращения шпинделя до  $4000 \text{ мин}^{-1}$  с возможностью угла поворота шпинделя на  $360^\circ$  в горизонтальной плоскости.

Конструкция угловой головки в 3D представлена на рис. 4.10

Шпиндельные бабки наряду с формой параллелепипеда имеют цилиндрическую форму. К таким конструкциям можно отнести корпус горизонтальной шпиндельной бабки станка МЦ200. Вертикально подвижная лобовая безконсольная шпиндельная бабка монтируется на порталной стойке, осуществляющей крестовое перемещение по осям X и Y.

Разработана 3D-модель шпиндельной бабки станка МЦ200 с горизонтальным расположением шпинделя [24, 25], представленная на рис. 4.11.

В конструкции рассматриваемого станка СВМ1Ф4 предусмотрен, в качестве автономного модуля стол поворотный управляемый. Он устанавливается в двух положениях с вертикальной и горизонтальной осью,

в зависимости от расположения обрабатываемой поверхности. Он состоит из корпуса, в котором находится червячная пара, передающая движение от высокомоментного двигателя на исполнительный орган – планшайбу (рис. 2.26 и рис. 2.28)

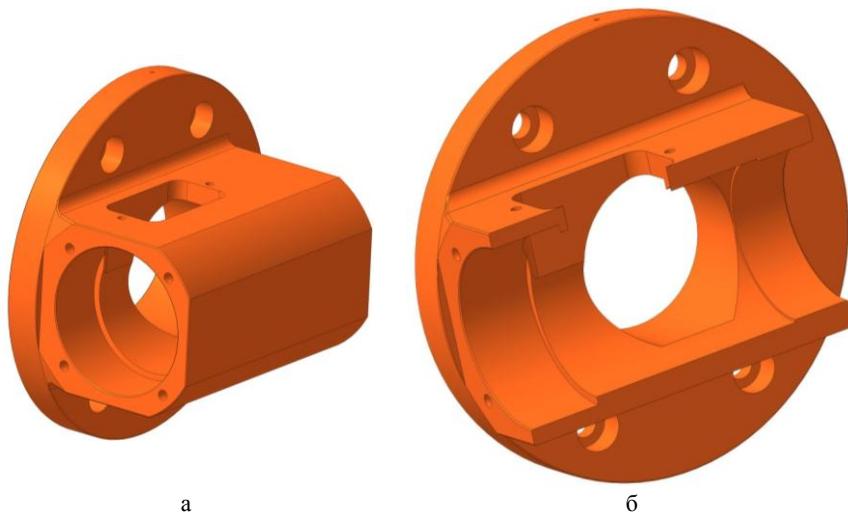


Рис. 4.10. Угловая шпиндельная головка: а – конструкция; б – сечение

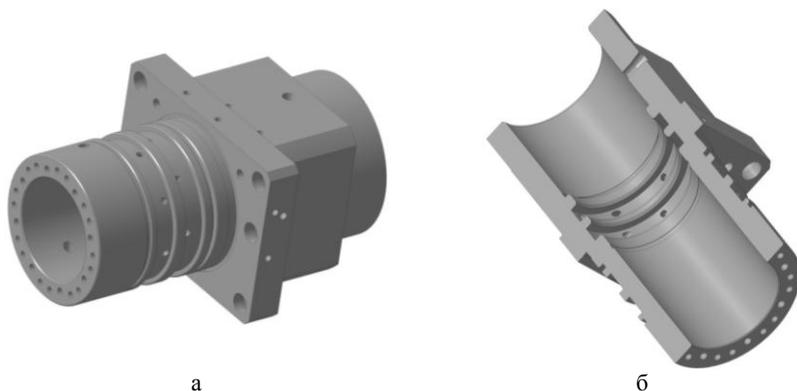


Рис. 4.11 Шпиндельная бабка станка МЦ200:  
а – конструкция; б – сечение

Наряду с формами параллелепипеда и цилиндра для вертикальных шпиндельных бабок может быть характерно и более сложные формы. К таким относится шпиндельная головка станка модели СВМ1Ф4., базовой деталью которой является корпус, представляющий собой фасонную чугунную отливку. Внутри корпуса смонтирована шпиндельная группа с механизмом зажима инструмента, промежуточный вал и вал-шестерня (рис.1.25).

В системе КОМПАС-3D разработана твердотельная модель корпуса шпиндельной головки [9, 10], представленная на рис. 4.12.

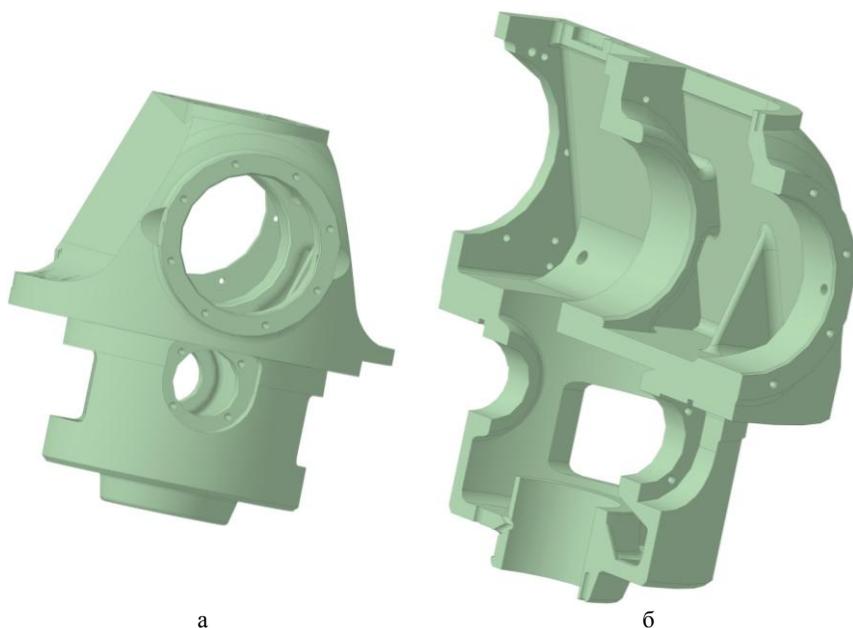


Рис. 4.12. Корпус шпиндельной головки станка СВМ1Ф4:  
а – конструкция; б – сечение

Сложность этого корпуса можно проиллюстрировать также его чертежом полученного в КОМПАС на основе принципа ассоциативности (рис. 4.13).

На верхнем основании корпуса смонтирован гидроблок (рис. 1.25), предназначенный для разжима инструмента и ориентации шпинделя для смены инструмента. На рис. 4.14 изображена твердотельная модель корпуса гидроблока [9].

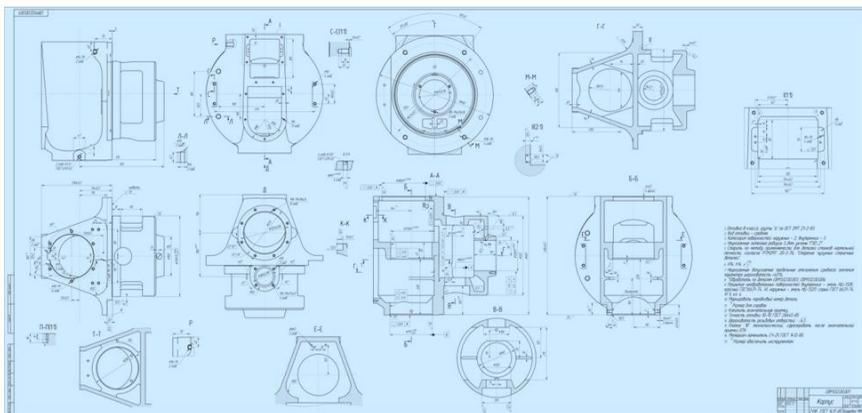


Рис. 4.13 Чертеж корпуса шпindelной головки

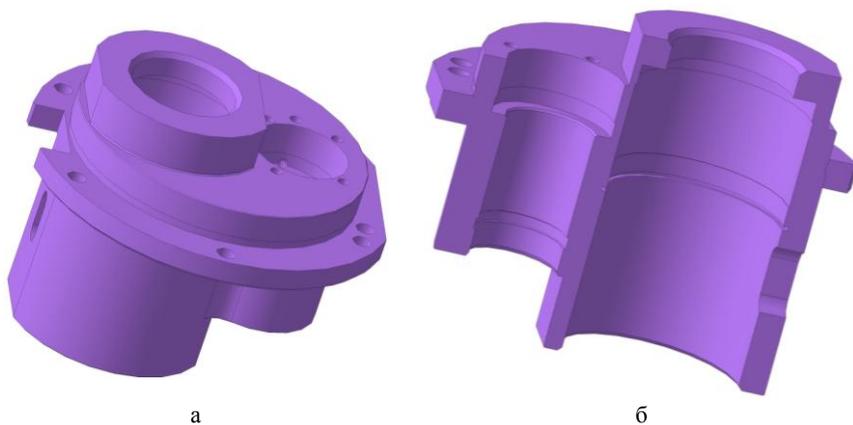


Рис. 4.14. Корпус гидроблока шпindelной головки: а – конструкция; б – сечение

В САПР КОМПАС-3D разработана модель корпуса поворотного стола (рис. 4.15)

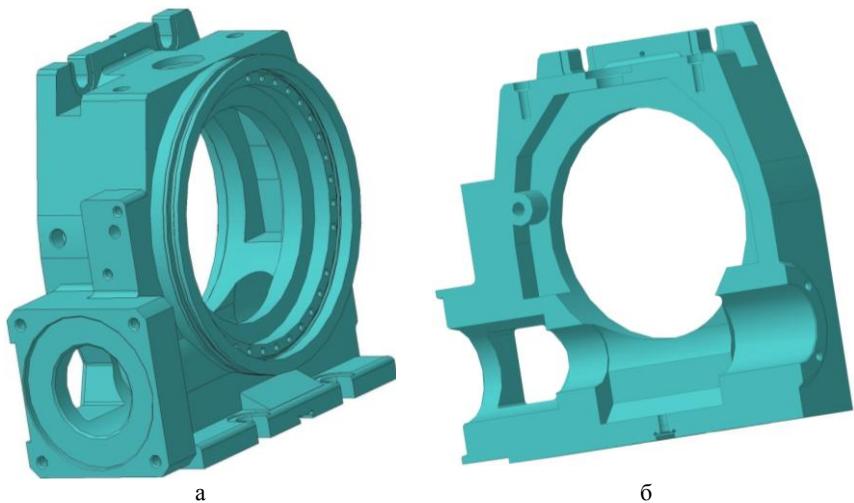


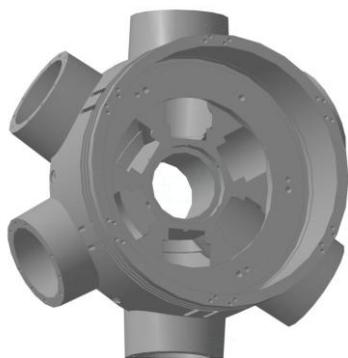
Рис. 4.15. Корпус поворотного стола:  
а – конструкция; б – сечение

### **4.3. Базовые детали шестишпиндельной револьверной головки**

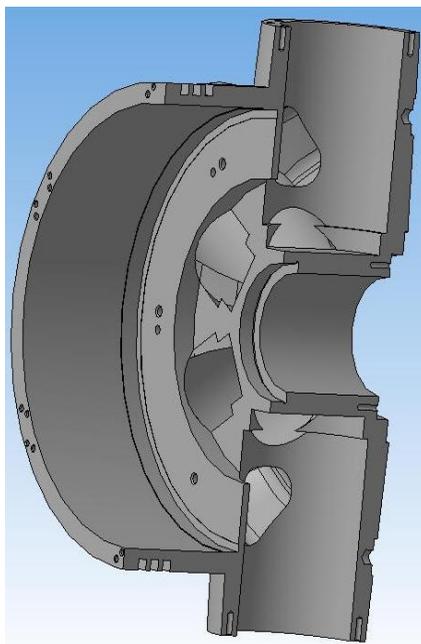
К числу базовых деталей относится достаточно сложный корпус шестишпиндельной револьверной головки специализированного вертикального фрезерно-сверлильного станка с ЧПУ модели СФ16МФ3. Это чугунный корпус, в радиальных расточках которого закрепляются шесть шпиндельных узлов (рис.1.38 и рис. 1.39), а на его торцах закреплено шесть жестких упоров. В пазах головки устанавливаются кулачки, которые служат для выбора инструмента. В центральной расточке устанавливается зубчатое колесо поворота головки.

В процессе исследования специализированного станка СФ16МФ3 построена твердотельная модель корпуса револьверной головки [20, 21], представленная на рис. 16.

Поворот револьверной головки осуществляется посредством шестерни, которая, в свою очередь, получает вращение по часовой стрелке от гидродвигателя (рис. 1.40). Базовая корпусная деталь механизма поворота револьверной головки в 3D создана в системе КОМПАС [20, 21] и представлена на рис. 4.17.



а



б

Рис. 4.16. Шестишпindleвая револьверная головка:  
а – конструкция; б – сечение

Формообразующий шпindleльный узел представляет двухопорную конструкцию. В процессе исследования построена твердотельная модель шпindleльного узла головки (рис. 1.41, и рис. 1.42). В передней опоре шпindleля установлен высокоточный радиально-упорный двухрядный конический роликовый подшипник, который воспринимает радиальные и двухсторонние осевые нагрузки и характеризуется допустимой радиальной нагрузкой в 1,7 раза выше, чем у соответствующего однорядного подшипника.

Кроме этого, радиально-упорный двухрядный роликовый подшипник обеспечивают повышенную жесткость опоры. В задней опоре установлены двойные радиально-упорные шарикоподшипники, которые воспринимают радиальные комбинированные и двусторонние осевые нагрузки, что в свою очередь позволяет применять их в плавающих опорах без фиксирования наружных колец в осевом направлении. Поэтому их эффективно использовать в узлах с большими осевыми усилиями при относительно высоких частотах вращения.

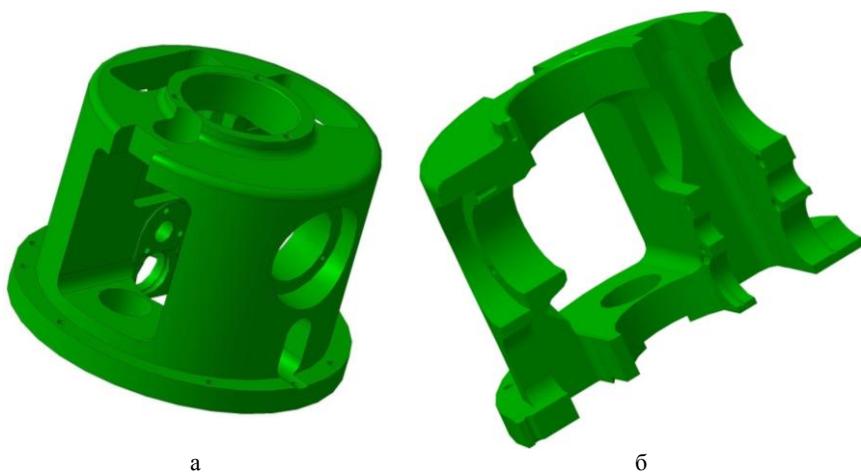


Рис. 4.17. Корпус привода поворота револьверной головки:  
а – конструкция; б – сечение

Разработана 3D-модель базовой детали шпиндельного узла – гильзы, представленной на рис. 4.18.

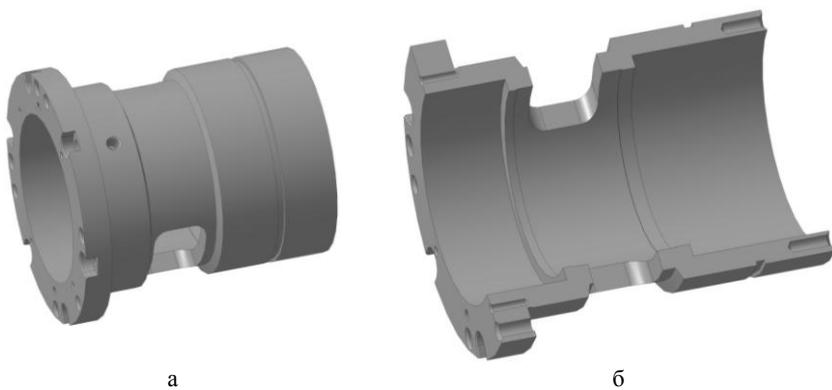


Рис. 4.18. Корпус шпиндельного узла станка СФ16МФ3:  
а – конструкция; б – сечение

---

---

## ВЫВОДЫ

1. В данной монографии в качестве базовой системы автоматизированного проектирования выбрана известная, динамично развивающаяся система КОМПАС, усиленная модулем АРМ FEM для целей комплексного исследования напряженно-деформированного состояния конструкций многооперационного станка и модулем Artisan Rendering для создания фотореалистических изображений.

2. Проведено комплексное исследование конструкций специализированных фрезерно-сверлильно-расточных станков второго и третьего типоразмеров моделей СФ68ВФ4, СВМ1Ф4, СФ16МФ3 и МЦ200ПФ4 с использованием геометрического моделирования в САПР КОМПАС и инженерного анализа проектируемого объекта с использованием модуля АРМ FEM.

3. Построены 3D - модели вышеуказанных металлорежущих станков и их формообразующих узлов в системе КОМПАС-3D, дающие реальное представление о конструкции и являющиеся основой для проектных расчетов и исследования работоспособности станка.

4. Построены твердотельные модели основных деталей шпиндельных устройств в среде САПР КОМПАС-3D с широким использованием прикладных библиотек КОМПАС и инструментария параметризации.

5. На основе 3D – моделей комплектующих реализованы сборки шпиндельных узлов с использованием процедур наложения реалистичных текстур и рендеринга в модуле Artisan Rendering, интегрированного в САПР КОМПАС.

6. Выполнено моделирование процесса сборки конструкции с использованием средств анимации, что обеспечивает эффективность процедуры анализа на технологичность.

7. Созданы конструктивные и расчетные схемы шпиндельных узлов как балок на двух шарнирных опорах. Осуществлен расчет напряженно-деформированного состояния и определены перемещения шпинделя как в случае неподвижных, так и упругих опор. Подтверждена работоспособность рассматриваемых конструкций по критерию жесткости.

8. Показана эффективность применения модуля комплексного анализа моделирования валов АРМ Shaft в режиме многовариантного проектирования шпиндельных узлов.

9. Разработана 3D-модель поворотного стола станка модели СВМ1Ф4 и предложено принципиально новое решение по внедрению беззазорной

червячной передачи, обеспечивающей повышенную точность в процессе длительной эксплуатации. Такой поворотный стол с вертикальной и горизонтальной осями вращения может быть унифицированным агрегатом и использоваться в широкой гамме фрезерных станков. Предложенная идея беззазорной червячной передачи подкреплена полученными патентами.

10. Выполнен всесторонний анализ напряженно – деформированного состояния шпинделей фрезерных станков в модуле APM STRUCTURE-3D методом конечных элементов. Построены поля эквивалентных напряжений и перемещений в различных сечениях проектируемого объекта, что дает возможность проводить экспресс – анализ конструкции по критериям прочности и жесткости.

11. Использован инструментарий параметрического моделирования интегрированной САПР APM WinMachine и построены параметрические формуляры, обеспечивающие повышения производительности проектировщика в процессе создания 3D-моделей и выполнение чертежей деталей и сборочных единиц станка.

12. Полученные в данной работе результаты позволяют осуществлять построение параметрических моделей, чертежей и 3D-моделей ременных передач различных конструктивных реализаций в режиме многовариантного проектирования. С помощью приложения «Валы и механические передачи» выполнено проектирование зубчатых ременных передач. Для зубчатых ременных передач предложены новые патентные решения, связанные с шевронным профилем зуба, для которого построены трехмерные изображения передачи.

13. Дан анализ особенностей проектирования конических зубчатых передач с круговым зубом. Так показано, как провести эффективную замену конического зубчатого колеса на эквивалентное цилиндрическое с использованием известных аналитических зависимостей.

14. Разработаны трехмерные модели базовых деталей металлорежущих станков. Такие сложные модели (корпус станины с коробкой скоростей станка СВМ1Ф4 изображаются на 5 листах формата А1) дают возможность реализовать сложные сборки и обеспечить создание моделей конструкций станка в целом.

15. Для исследования работоспособности системы автоматической смены заготовок предложен комплекс твердотельных моделей основных ее компонентов – дискового инструментального магазина на 14 позиций, автооператора и целого набора 3D-моделей инструментальной оснастки фрезерных станков.

16. Широкий спектр описанных выше возможностей, предоставляемых интегрированной САПР КОМПАС-3D и встроенными в систему модулями APM FEM, Artisan Rendering и большого набора прикладных библиотек позволяет существенно улучшить качество проектирования металлорежущих станков и сократить сроки подготовки конструкторской документации

---

---

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кроль О.С. Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов: монография/ О.С. Кроль. – Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2014. – 154 с.
2. Krol O. Modeling of construction spindle's node machining centre/ Krol O, Osipov V.//ТЕКА Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, № 3, Lublin, Poland. – P. 108-113.
3. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
4. Попов В.А. Динамика станков / В.А. Попов, В.А. Локтев. – К.: Техніка, 1975. – 136 с.
5. Кроль О.С. Расчет податливости станка СФ68ВФ4 и моделирование динамики формообразования/ О.С. Кроль, А.А. Кроль // Вісник СевНТУ, вип. 117 «Машинобудування та транспорт». – 2011, С. 81-84.
6. Пуш А. В. Шпиндельные узлы. Качество и надежность / А. В. Пуш. – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.
7. Замрий А.А. Практический учебный курс CAD/CAE APM WinMachine. Учебно-методическое пособие / А.А. Замрий – М.: Изд-во АПМ, 2007. – 144 с.
8. Магомедов А. Интегрированный конечно-элементный анализ в КОМПАС-3D / А. Магомедов, А. Алехин // CAD/CAM/CAE observer. – 2010. – #8(60). – С. 1-5.
9. Krol O. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 [Text] /O.Krol, I.Sukhorutchenko. - Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. Vol.13, № 3. – Lublin, 2013. – p. 114-126.
10. Кроль О.С. Трехмерное моделирование многооперационного станка модели SVM1F4 в среде КОМПАС 3D/ О.С. Кроль, И.А. Сухорутченко// Восточноевропейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/7(70). – С. 13-18.
11. Проников, А. С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Справочник-учебник в 3-х т. Т.1. Проектирование станков [Текст] / А. С. Проников, В. В. Бушуев, В. Э. Пуш и др. – М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. – 444 с.
12. Krol O. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non - clearance worm gearing O. Krol, S. Shevchenko, I. Sukhorutchenko, A. Lysenko [Text] // ТЕКА Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. –Vol.14. – № 1. 2014.– Lublin, Poland. - P. 126-133.
13. Пат. 95715Україна, МПК F16Н1/16Безззорна черв'ячна передача / С.В.Шевченко, О.С.Кроль, І.О. Сухорутченко; Заявл. 21.03.2014; Опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1.

14. Пат. 99664 Україна, МПК В23Q16/02. Поворотний стіл металорізального верстата / С.В.Шевченко, О.С.Кроль, І.О. Сухорученко; Заявл. 19.02.2015; Опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11.
15. Детали машин, Учебник для вузов/М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. – М.: Высш.шк., 2005. – 408 с.
16. Решетов Д. Н. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
17. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. IV-1. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка; под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1995. – 864 с.
18. Шелюфаст В.В., Чугунова Т.Б. Основы проектирования машин. Примеры решения задач. – М.: Изд-во АПМ, 2004. – 240 с.
19. Розинский С., Шанин Д., Григорьев С. Параметрические возможности графического модуля АРМ Graph системы АРМ WinMachine. САПР и графика, вып.11, 2001. – с.37-40.
20. Krol O. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3/ Krol O, Juravlev V.//ТЕКА Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, № 4, Lublin, Poland. – P. 141-147.
21. Кроль О.С. 3D-моделирование и расчеты привода главного движения фрезерного станка с шестишпиндельной револьверной головкой/ О.С. Кроль, В.В. Журавлев// Вісник НТУ «ХП». – 2014. – №40(1083). – С. 87-99.
22. Кроль О.С. Исследование шпиндельного узла многооперационного станка модели СФ16МФ3/ О.С. Кроль// Вісн. Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2014. – № 6. – С. 121-125.
23. Кондрашова С.Г. Инженерное проектирование механизмов с использованием системы АРМ WinMachine/ С.Г Кондрашова, Д.А. Хамидулина, В.А. Лашков. – Вестник Казанского технологического университета, № 19. – 2011. – С. 193-198
24. Кроль О.С. Моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра/О.С.Кроль, Е.И.Бурлаков// Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП» - № 11(985), 2013. – С. 33-38.
25. Кроль О.С. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра/О.С.Кроль, А.А.Кроль, Е.И. Бурлаков//Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП» - № 16(989), 2013. – С. 14-18.
26. Сокол И. База данных АРМ Data – связующий элемент в структуре системы АРМ WinMachine/ И. Сокол, Ю. Савченко, Д. Шанин, С. Розинский//САПР и графика, № 9, 2002. – С. 9-12.
27. Кроль О.С., Нерубашенко А.А., Кроль А.А. Создание базы данных параметрических моделей деталей станков в модуле АРМ Base/ О.С. Кроль, А.А. Нерубашенко, А.А.Кроль // Вісник СевНТУ, 2010, вип.107. – С.107-109.
28. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation/ А. А. Алямовский// М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
29. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи/ А. А. Алямовский// Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. – 441 с.
30. Ганин Н.Б. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D/Н. Б. Ганин. – М.: ДМК, 2012. – 776 с.

31. Ганин Н.Б. Проектирование и прочностной расчет в системе КОМПАС-3D/Н. Б. Ганин. – М.: ДМК, 2011. – 320 с.
32. Бальмонт В.Б. и др. Расчеты высокоскоростных шпиндельных узлов. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – 52 с.
33. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. 2. Ч. 1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников, Е. И. Борисов, В. В. Бушуев и др.- М.: Машиностроение, 1995. – 371 с.
34. Проектування металорізальних верстатів у середовищі АРМ WinMachine: підручник/ О.С. Кроль, С.В.Шевченко, В.І.Соколов. – Луганськ, вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. – 386 с.
35. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т.1. Проектирование станков/ А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др. – М.: Машиностроение, 1994, 444 с.
36. Кроль О.С. Построение параметрических моделей ременных передач с использованием системы АРМ WINMACHINE/ О.С. Кроль// Восточноевропейский журнал передовых технологий. – Х.: - 2012. № 2/7(62). – С. 61-63.
37. Кроль О.С. Параметрическое моделирование конструкций металлорежущих станков и инструментов: учебное пособие/ О.С. Кроль// Северодонецк, изд-во ВНУ им. В. Даля, 2015. – 128 с.
38. Кроль О.С., Кроль А.А. Использование САПР АРМ WinMachine в задачах исследования зубчатых ременных передач, Вісн. Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. – № 13(184). – С. 147-153.
39. Пат. 99663 Україна, МПК F16 7/02. Передача зубчастим ременем / С.В.Шевченко, О.С.Кроль, О.А.Муховатий, І.О. Сухорутченко; Заявл. 19.02.2015; Опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11.
40. Пат. 100880 Україна, МПК F16 7/02 Передача зубчастим ременем / С.В. Шевченко, О.С. Кроль, О.А. Муховатий, І.О. Сухорутченко; Заявл. 16.03.2015; Опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.
41. Кроль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография/ Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012, 116 с
42. Платонов Л. Машиностроительное проектирование в КОМПАС-3D V14 на новом витке развития, или Полезные новинки пакета обновлений MCAD SP1 от АСКОН/ Л. Платонов// САПР и графика, № 10, 2013. – С. 6-12.
43. Голованев В. КОМПАС-3D от «Шафта» к «Валам и механическим передачам»/ В. Голованев. – САПР и графика, май 2013. – С. 22-23.
44. Платонов Л. 15 новинок КОМПАС-3D V15/ Л. Платонов Л// САПР –журнал , № 6, 2014. – С. 7-21.
45. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач / Под ред. И. А. Болотовского. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. 448 с.
46. Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств/ А.Р. Маслов. - М.: Машиностроение, 2006. – 336 с.
47. Аверьянов О.И. Основы проектирования и конструирования. Учебное пособие/О.И. Аверьянов, В.Ф. Солдатов. – М.: МГИУ, 2008. – 160 с.

48. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машгиз, 1963. – 953 с.
49. Металлорежущие станки. В 2 т. / Т.М. Аврамова, В.В. Бушуев, Л.Я. Гиловой и др. ; под ред. В.В. Бушуева. Т. 1. – М.: Машиностроение, 2012. – 608 с.
50. Каминская В.В. Расчетный анализ динамических характеристик несущей системы станка / В.В. Каминская, А.В Гринглаз // Станки и инструмент, 1989. – №2. – С. 10-13.
51. Еремин А.В. Расчет жесткости несущей системы станка на основе суперэлементного подхода / А.В. Еремин, А.В. Чеканин // Станки и инструмент, 1991. – №6. – С. 12-16.

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
<b>1. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ФРЕЗЕРНО-СВЕРЛИЛЬНО-РАСТОЧНОГО ТИПА .....</b>	<b>7</b>
1.1. 3D-моделирование обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4 ...	7
1.1.1. Вертикальная шпиндельная головка.....	15
1.1.2. Угловая шпиндельная головка .....	17
1.2. 3D- Моделирование станка вертикального многооперационного модели СВМ1Ф4 .....	22
1.2.1. Шпиндельная бабка.....	25
1.2.2. Поворотный стол .....	27
1.3. 3D-моделирование фрезерно-сверлильного станка с шестишпиндельной головкой модели СФ16МФ3 .....	35
1.3.1. Шестишпиндельная револьверная головка .....	38
1.3.2. Шпиндельный узел.....	41
1.3.3. Моделирование шпинделя в среде АРМ Structure 3D.....	43
1.4. 3D-моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра модели МЦ200 .....	49
<b>2. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ .....</b>	<b>56</b>
2.1. Ременные передачи .....	56
2.1.1. Проектирование зубчатременной передачи в системе КОМПАС .....	62
2.2. Зубчатые передачи .....	67
2.3. Червячные передачи .....	75
<b>3. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>79</b>
3.1. Инструментальный магазин с автооператором .....	79
3.2. Инструментальная оснастка .....	84
3.3. Режущий инструмент.....	90

4. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ .....	97
4.1. Базовые детали фрезерных станков.....	97
4.2. Базовые детали коробок передач .....	102
4.3. Базовые детали шестишпindelной револьверной головки.....	109
 ВЫВОДЫ .....	 112
 СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	 114

Научне видання

КРОЛЬ Олег Семенович

**МЕТОДЫ И ПРОЦЕДУРЫ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ИНСТРУМЕНТОВ**

*Монографія*

Друкується в авторській редакції

Оригінал-макет            Могильна О.В.

Підписано до друку 15.11.2015.

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір типогр. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. 7,1. Обл.-вид. арк. 8,3.

Тираж 100 екз. Вид. № 3034. Запов. №        . Ціна договірна.

**Видавництво Східноукраїнського національного університету  
імені Володимира Даля**

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: просп. Радянський 59-А

м. Северодонецьк, 93400, Україна

e-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com.

**Надруковано у типографії Мадрид, ООО**

Свідоцтво про реєстрацію:

Адреса типографії: вул. Ольминського, 11,

м. Харків, 61024, Україна

e-mail: : info@madrid.in.ua